



PROJETO DE GRADUAÇÃO

COMPORTAMENTO DO AMORTECIMENTO E DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE UMA LIGA NiTi EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Por,

Gabriel Kabir de Abreu Costa

Brasília, 01 de julho de 2015.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

COMPORTAMENTO DO AMORTECIMENTO E DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE UMA LIGA NiTi EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Por,

Gabriel Kabir de Abreu Costa

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Edson Paulo da Silva, UnB/ENM (Orientador)

Prof. Cosme Roberto Moreira da Silva , UnB/ENM

Prof. Daniel Rosa, UnB/ENM

Brasília, 01 de julho de 2015.

Dedicatória

Dedico esta monografia à toda a minha família que sempre me aconselhou e me ajudou em todos os momentos de minha vida e aos meus verdadeiros amigos que estiveram ao meu lado me incentivando nesta árdua caminhada.

Gabriel Kabir de Abreu Costa.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus e aos meus pais pela oportunidade que me deram de sempre proporcionar educação de qualidade, a minha namorada Emily Santos que me ajudou em momentos muito difíceis durante a minha graduação, aos meus colegas de curso Paulo Herrera e Rodrigo Roque e, principalmente, ao meu professor orientador que esteve disponível a me auxiliar em todos os momentos, Edson Paulo da Silva.

Gabriel Kabir de Abreu Costa

Em relação às ligas NiTi com memória de forma, a elevada capacidade de amortecimento, tanto durante a transformação de fase quanto na fase martensítica e o aumento da rigidez durante a transformação de fase evidenciam a extensa diversidade de aplicações tecnológicas na qual esse tipo de material fornece como, por exemplo, em mancais de rigidez variável. O objetivo do presente trabalho é investigar experimentalmente a influência do tratamento criogênico brusco nas curvas de módulo elástico e de amortecimento em função da temperatura de uma liga Ni₅₅Ti₄₅ (wt%) com memória de forma. Ambas as propriedades foram medidas pela técnica de excitação por impulso ao longo das transformações de fase entre -10 e 100°C. Os resultados mostraram que o módulo elástico apresentou pouca variação durante o ciclo de aquecimento e resfriamento, evidenciando que esta propriedade é pouco sensível a tratamentos térmicos, porém, muito dependente da composição química e do tipo de ligação existente no material. O amortecimento apresentou um aumento significativo de, aproximadamente, 95% após o tratamento criogênico, evidenciando que esta propriedade é muito sensível ao tratamento térmico.

ABSTRACT

Regarding the NiTi shape memory alloys, high damping capacity, both during the phase transformation and in the martensite phase and increase the stiffness during phase transformation show extensive diversity of technological applications in which this type of material provides as, for example, a variable stiffness bearing. The objective of this research is to experimentally investigate the influence of sudden cryogenic treatment in elastic modulus and damping curves as function of the temperature of a Ni₅₅Ti₄₅ (wt%) shape memory alloy. Both properties were measured by the impulse excitation technique over the phase transformations between -10 and 100 ° C. The results showed that the elastic modulus showed little variation during heating and cooling cycle, indicating that this property is not very sensitive to heat treatments, however, very dependent on the chemical composition and the type of the material existing connection. The damping showed a significant increase of, approximately, 95% after cryogenic treatment, indicating that this property is very sensitive to heat treatment.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	1
1.2 OBJETIVO	2
1.3 METODOLOGIA.....	2
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	3
2.1.1 Contexto Histórico.....	3
2.1.2 Transformação Martensítica.....	3
2.2 LIGAS NiTi.....	6
2.2.1 Aplicações das Ligas NiTi.....	7
2.2.1.1 Aplicações na Medicina	8
2.2.1.2 Aplicações na Odontologia.....	8
2.2.1.3 Aplicações Industriais	8
2.3 COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DAS SMA.....	10
2.3.1 Pseudoelasticidade	10
2.3.2 Quasiplasticidade	12
2.3.3 Efeito Memória de Forma	13
2.4 PROPRIEDADES DAS LIGAS NiTi.....	14
2.5 PROPRIEDADES DE ANÁLISE.....	15
2.5.1 Amortecimento	15
2.5.1.1 Amortecimento Interno.....	15
2.5.1.2 Amortecimento Viscoelástico	16
2.5.2 Módulo de Elasticidade.....	18
2.5.3 Temperaturas de Transformação de Fase	21
2.5.4 Caracterização de Módulo de Elasticidade e de Amortecimento	21
2.5.5 Técnica de Excitação por Impulso.....	22
2.5.5.1 Frequências Naturais	22
2.5.5.2 Método do Decremento Logarítmico.....	23
2.5.5.3 Método da Largura de Banda	25
2.6 TRATAMENTOS CRIOGÊNICOS	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1 ANÁLISE DO MATERIAL.....	27
3.2 O TRATAMENTO CRIOGÊNICO.....	28
3.3 EQUIPAMENTO DE ENSAIO - SONELASTIC®.....	29
3.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO.....	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 RESULTADOS E ANÁLISES DA TÉCNICA DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO	34
5 CONCLUSÕES	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
ANEXOS.....	44

LISTA DE FIGURAS

2.1	Diagrama Tensão-deformação e as transformações de fase em uma liga NiTi com memória de forma	4
2.2	Fração percentual de formação da martensita em função das temperaturas de transformação de fase.....	5
2.3	Diagrama de fases NiTi.....	6
2.4	Representação esquemática de atuação de uma liga NiTi utilizada na fixação de ossos fraturados.....	9
2.5	Processo de ação de um fio ortodôntico de liga NiTi	9
2.6	Luva de ligação de tubos: inserção dos tubos, a frio; martensita, ajuste dos tubos devido ao aquecimento da manga, transformação da martensita em austenita.....	10
2.7	Representação esquemática da aplicação de ligas com memória de forma como atuadores térmicos em um automóvel. (1) Veneziana do radiador; (2) Sistema de embreagem; (3) Sistema de controle de combustível; (4) Controle de temperatura; (5) Mecanismos de controle do motor; (6) Resfriamento dos freios; (7) Sistema de transmissão/redução de ruídos; (8) Ajuste de suspensão	10
2.8	Diagrama tensão-deformação em relação ao comportamento da pseudoelasticidade em uma SMA	11
2.9	Efeito da variação de temperatura sobre o comportamento termomecânico em uma liga NiTi	12
2.10	Representação do efeito da quasiplasticidade em um diagrama típico tensão-deformação	13
2.11	Transformação de fase em uma típica liga NiTi com memória de forma	14
2.12	Evolução do módulo elástico em função da temperatura para uma liga NiTi	15
2.13	Variação do atrito interno em função da temperatura para uma liga NiTi	15
2.14	Curva de histerese típica para amortecimento mecânico.....	16
2.15	Representação esquemática de um sistema massa-mola-amortecedor com parâmetros concentrados	17
2.16	Representação esquemática entre os diferentes tipos de movimento em relação ao fator de amortecimento	18
2.17	Diagrama de tensão-deformação em regime elástico.....	19
2.18	Diagrama de tensão-deformação em regime elástico não-linear e determinação dos módulos tangencial e secante	20
2.19	Relação de força-separação de ligações interatômicas fortes e fracas. A magnitude do módulo de elasticidade é proporcional à inclinação de cada curva em r_0	20
2.20	Resposta ao impulso para um oscilador com 1 grau de liberdade	23
2.21	Quadro resumo com os principais conceitos para a determinação do amortecimento pelo método do decremento logarítmico	24
2.22	Método da largura de banda para a determinação do amortecimento em um sistema com 1 grau de liberdade	25
3.1	Liga Ni ₅₅ Ti ₄₅ (wt%) utilizada.....	27
3.2	Reservatório para armazenamento de nitrogênio líquido e recipiente para imersão de corpos de prova	28
3.3	Temperatura e tempo de encharque para o tratamento criogênico da Amostra_2 ..	28
3.4	Software <i>Sonelastic® versão 2.2</i>	28
3.5	<i>Sonelastic® Crio</i> ; 1: Núcleo de excitação e captação de sinal; 2: Câmara de aquecimento onde se encontra o corpo de prova; 3: Varetas de condução de calor; 4: Recipiente para armazenamento do nitrogênio líquido; 5: Elevador; 6: Controlador de temperatura; 7: Controlador do elevador	29
3.6	Detalhe do núcleo de excitação e captação de sinal.....	30
3.7	Suporte para sustentação da amostra; 1: Amostra; 2: Orifício para fixação do suporte; 3: Ajuste de tensão dos fios metálicos de cobre; 4: Orifício para passagem da vareta de condução.	30
3.8	Princípio básico de funcionamento do <i>Sonelastic®</i>	31
3.9	Rampas de aquecimento e resfriamento programadas.....	33
4.1	Módulo de elasticidade em função da variação de temperatura para a Amostra_1 ..	35

4.2	Amortecimento em função da variação de temperatura para a Amostra_1	36
4.3	Módulo de elasticidade em função da variação de temperatura para a Amostra_2.	36
4.4	Amortecimento em função da variação de temperatura para a Amostra_2	37
4.5	Curva de amortecimento durante o aquecimento da Amostra_1	38
4.6	Curva de amortecimento durante o resfriamento da Amostra_1.....	38
4.7	Curva de amortecimento durante o aquecimento da Amostra_2	39
4.8	Curva de amortecimento durante o resfriamento da Amostra_2.....	39
4.9	Temperatura em função do tempo para a Amostra_1	40
4.10	Temperatura em função do tempo para a Amostra_2	40

LISTA DE TABELAS

2.1	Principais propriedades da ligas NiTi com memória de forma	7
3.1	Composição química da liga NiTi em estudo	27
3.2	Temperaturas de transformação de fase para a liga NiTi em estudo	27
3.3	Dados referentes ao comprimento, diâmetro e massa da Amostra_1.....	32
3.4	Dados referentes ao comprimento, diâmetro e massa da Amostra_2.....	32
4.1	Diferenças percentuais de amortecimento durante aquecimento e resfriamento em relação as fases das amostras 1 e 2.....	34
4.2	Diferenças percentuais de módulo de elasticidade durante aquecimento e resfriamento em relação as fases das amostras 1 e 2.....	35

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

d	Capacidade de amortecimento por unidade de volume
Q	Fator de qualidade
M_s	Temperatura de início da transformação direta da austenita em martensita
M_f	Temperatura final da transformação direta da austenita em martensita
A_s	Temperatura de início da transformação reversa da martensita em austenita
A_f	Temperatura final da transformação reversa da martensita em austenita
T_d	Maior temperatura na qual a martensita será formada
E	Módulo de elasticidade
G	Módulo de cisalhamento
E^*	Módulo de elasticidade complexo
T	Temperatura
F	Força
m	Massa
t	Tempo
k	Constante de rigidez elástica
c	Constante de amortecimento
L	Comprimento do corpo de prova
r_0	Separação interatômica de equilíbrio

Símbolos Gregos

δ	Decremento logarítmico
ε	Deformação
εL	Deformação recuperável máxima
ε_0	Deformação quasiplástica
ξ	Fração volumétrica de martensita
ω_0	Frequência natural
ω_d	Frequência natural amortecida
σ	Tensão
σ_{crit}	Tensão crítica
σA_s	Tensão inicial da transformação da austenita induzida por tensão
σA_f	Tensão final da transformação da austenita induzida por tensão
σ_s	Tensão da martensita maclada
σ_f	Tensão da martensita demaçada
V_l	Velocidade longitudinal do som
V_s	Velocidade transversal do som

Grupos Adimensionais

ζ	Fator de amortecimento
ν	Razão de Poisson
n	Número de picos
A_n	Amplitude do último pico
A	Amplitude do primeiro pico

Subscritos

<i>crit</i>	crítico
<i>s</i>	start (inicial)
<i>f</i>	finish (final)
<i>p</i>	pico
<i>0</i>	equilíbrio
<i>máx</i>	máximo(a)
<i>L</i>	máximo(a)
$M \rightarrow A$	Transformação reversa da martensita para austenita
$A \rightarrow M$	Transformação direta da austenita para martensita
ST	Sem tratamento térmico

Sobrescritos

- Variação temporal

Siglas

<i>ccc</i>	cúbica de corpo centrado
<i>cfc</i>	cúbica de face centrada
<i>SMA</i>	Shape Memory Alloy
<i>DSC</i>	Differential Scanning Calorimeter

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta as considerações gerais referentes às características mecânicas e termomecânicas de ligas com memória de forma (Shape Memory Alloys – SMA), contendo o contexto e motivação do trabalho, assim como a metodologia utilizada e a estruturação básica elaborada.

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

As ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys* – SMA) são materiais que apresentam como principal característica mecânica a capacidade de recuperação de sua geometria original quando sujeitas a um ciclo térmico e/ou mecânico adequado (Delaey et al, 1974). Esse efeito está intimamente relacionado às transformações de fase do tipo martensítica termoelástica que acontecem no interior do material (Silva et al, 2011).

As SMA apresentam, basicamente, dois principais comportamentos termomecânicos: efeito memória de forma e a pseudoelasticidade. A capacidade de recuperação dessas ligas quando expostas a deformações de até 10% é bastante elevada quando submetidas a um aquecimento, após sofrerem deformações abaixo da temperatura M_f , ou após serem submetidas a um ciclo de carregamento e descarregamento acima da temperatura A_f (Lagoudas, 2008).

A elevada multifuncionalidade das ligas com memória de forma garantem um diversificado potencial de aplicações em muitas áreas, desde a medicina, com produtos conhecidos como *stents*, aparelhos ortodônticos e fios guia, à engenharia aeroespacial (Otsuka &Wayman, 1998).

Uma propriedade importante desse grupo de materiais ativos é a superior capacidade de amortecimento quando comparados a outros materiais estruturais convencionais. Apresentam elevadas taxas de amortecimento tanto durante a transformação de fase quanto na fase martensítica, em baixas temperaturas (Silva et al, 2011). À medida em que a temperatura aumenta, a capacidade de amortecimento em ligas NiTi tende a diminuir gradativamente, ou seja, na fase martensítica este parâmetro é maior em relação à fase austenítica. Este comportamento pode ser explicado através da absorção de energia provocada pelas plaquetas de martensita (Catão et al, 2012).

Em relação ao módulo de elasticidade, em ligas com memória de forma espera-se que este parâmetro seja baixo em seu estado martensítico. Durante a transformação de fase se verifica a presença de um pico da capacidade de amortecimento e um aumento no módulo de elasticidade ou rigidez (CAI,W et al, 2005).

O aumento do módulo de elasticidade com a temperatura em ligas NiTi indica um acréscimo na rigidez do material, ou seja, haverá uma menor dissipação de energia pela estrutura correspondente a altas temperaturas (austenita). Essa elevação no módulo elástico ocorre pelas mesmas razões que são verificados aumentos na capacidade de amortecimento em ligas com memória de forma, relacionados a movimentos internos na estrutura do material, apresentando rigidez inferior na fase martensítica quando comparada à fase austenítica (Otsuka & Wayman, 1998).

Esses fatores motivaram o estudo referente à influência da variação de temperatura sobre o módulo de elasticidade e amortecimento em ligas NiTi com memória de forma.

1.2 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é avaliar experimentalmente o comportamento dos módulo de elasticidade e amortecimento em função da temperatura em uma liga NiTi com memória de forma.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada baseia-se no levantamento experimental do amortecimento e do módulo de elasticidade de um corpo de prova de uma liga NiTi em função da temperatura pela técnica de excitação por impulso. Por essa técnica, aplica-se um impulso ao corpo de prova e capta-se as suas frequências naturais de vibração e o decaimento. A partir das frequências calcula-se o módulo de elasticidade e do decaimento o amortecimento.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estruturação do trabalho é desenvolvida em cinco capítulos. Primeiramente, no capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica com as informações principais sobre as características mecânicas (módulo de elasticidade e amortecimento) e termomecânicas das ligas NiTi, além de suas propriedades microestruturais. No capítulo 3, será desenvolvida a caracterização do material e o método experimental de pesquisa, através da técnica de excitação por impulso em função da temperatura. No capítulo 4, será realizada a documentação de todos os resultados e avaliações dos ensaios dinâmicos para o corpo de prova de liga NiTi. No capítulo 5 as considerações finais são explicitadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta as principais informações sobre as propriedades mecânicas e termomecânicas das ligas com memória de forma (Shape Memory Alloys – SMA), as propriedades de análise para o estudo e as técnicas utilizadas para caracterização.

2.1 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

2.1.1 Contexto Histórico

As ligas de memória de forma são materiais metálicos que apresentam os comportamentos de pseudoelasticidade e efeito memória de forma. As primeiras observações a respeito das ligas com memória de forma datam da década de 1930. Em 1932, Chang e Read notaram o efeito da reversibilidade geométrica tanto em observações metalográficas, quanto em mudanças de resistividade em uma liga Au-Cd (Hodgson & Biermann, 1990). Porém, o primeiro pesquisador a observar esse fenômeno em ligas metálicas foi Arne Olander, em 1938 (Otsuka & Wayman, 1998).

Greninger, da Universidade de Harvard, e Mooradian, do *Massachusetts Institute of Technology*, também observaram o efeito de memória de forma em ligas de Cu-Zn e Cu-Sn. Entretanto, somente na década de 1960, as ligas com memória de forma começaram a atrair notável interesse tecnológico (Hodgson & Biermann, 1990).

Em 1962, Buehler e outros pesquisadores do *U.S. Naval Ordnance Laboratory* descobriram o efeito memória de forma em uma liga NiTi, que se tornou conhecida como Nitinol, em referência às iniciais do laboratório. Durante a década de 1960, Raychem desenvolveu a primeira aplicação industrial das ligas com memória de forma na área aeronáutica (Hodgson & Biermann, 1990).

Atualmente, observa-se um elevado crescimento da pesquisa e de aplicações em relação às SMA (Fernandes, 2003).

2.1.2 Transformação Martensítica

Basicamente, as SMA apresentam duas fases cristalográficas bem definidas: austenita e martensita (Delaey et al, 1975).

A martensita é a fase estável na ausência de tensões, além disso, pode ser induzida por tensão. Também pode ser facilmente deformada, alcançando deformações reversíveis de até, aproximadamente, 8% (Hodgson & Biermann, 1990).

Dependendo dos tipos de transformações nas quais as SMA são submetidas, a estrutura cristalina da martensita pode ser monoclinica ou ortorrômbica (Otsuka & Ren, 1999).

A martensita induzida termicamente é chamada de martensita maclada e possui 24 variantes, ou seja, 24 orientações cristalográficas. Por outro lado, quando a martensita é induzida mecanicamente, essas 24 variantes de martensita maclada tornam-se somente uma variante (Funakubo, 1987). Como consequência, existe uma orientação cristalográfica, alinhada com a direção da tensão. Neste caso, a martensita é chamada de demaclada. A Figura 2.1 mostra esquematicamente como se caracterizam essas transformações de fase em uma típica liga NiTi com memória de forma.

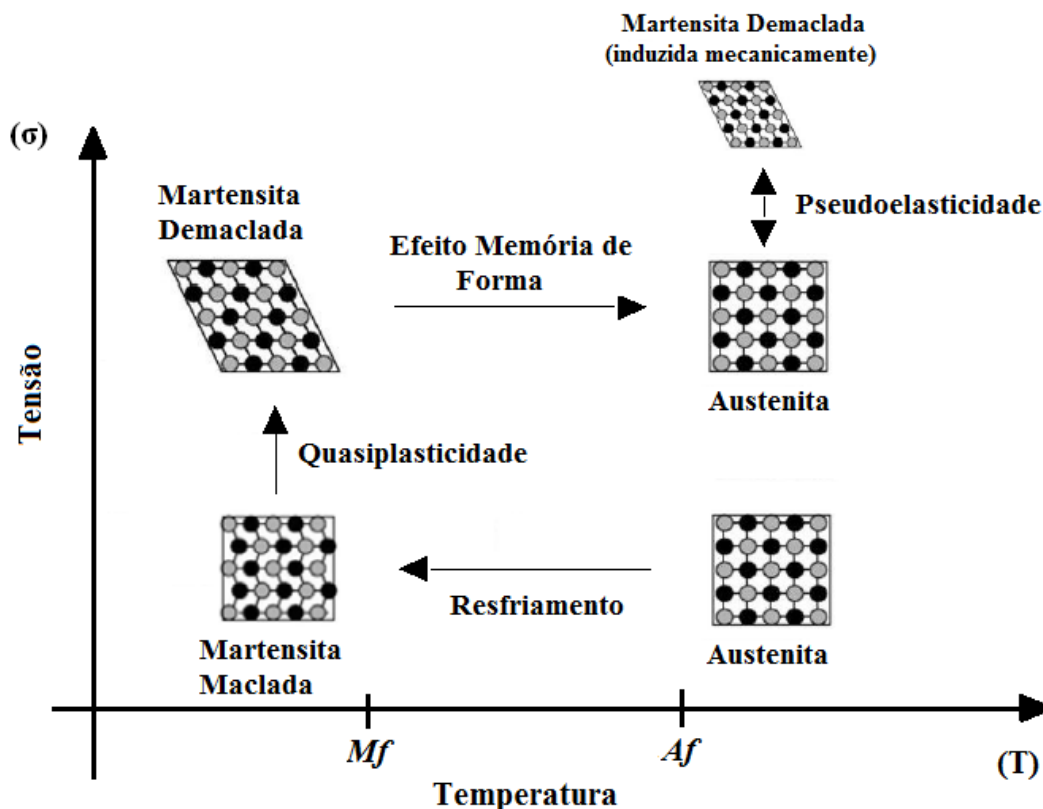


Figura 2.1 – Diagrama Tensão-deformação e as transformações de fase em uma liga NiTi com memória de forma.

A fase austenita é estável acima de A_s e apresenta, nas ligas NiTi com memória de forma, uma única variante de estrutura cúbica de corpo centrado (*ccc*) e, em outras ligas como Cu-Al-Be estruturase como cúbica de face centrado (*cfc*). A transformação martensítica é importante para explicar a ocorrência de recuperação de forma nas SMA. Essa transformação ocorre dentro de uma faixa de temperaturas que variam conforme a composição química de cada liga (SMA, Inc, 2001). As temperaturas de transformação de fase são identificadas como: M_s : Temperatura de início da formação de martensita, M_f : Temperatura final de formação de martensita, A_s : Temperatura de início da formação de austenita, A_f : Temperatura final de formação da austenita.

Estudos recentes têm mostrado que, dependendo de algumas condições específicas, algumas SMA podem apresentar outra fase cristalográfica, conhecida como Fase-R. A Fase-R é uma fase intermediária entre a martensita e a austenita. Para liga NiTi, a estrutura cristalina da Fase-R é romboédrica (Otsuka & Ren, 1999; Wu & Lin, 2000).

A Figura 2.2 representa a variação da fração percentual de martensita em função da temperatura no estado livre de tensões. Quando o material é aquecido a curva superior é percorrida e ao atingir a temperatura A_s têm-se o início de formação da austenita. O processo de transformação continua com o aquecimento até atingir a temperatura A_f , indicando que o material atingiu 100% de austenita. Quando o material é resfriado a curva inferior é percorrida até atingir a temperatura M_s , na qual inicia-se o processo de formação de martensita. O processo de transformação continua até atingir a temperatura M_f , indicando que o material é constituído por 100% de martensita (Shaw & Kyriakides, 1995).

As variações que ocorrem na estrutura cristalina das SMA estão diretamente associadas aos choques de discordâncias e defeitos cristalinos decorrentes da dissipação de energia relacionada ao processo de transformação. Como consequência, há um ciclo de histerese na temperatura, conforme ilustra a Figura 2.2. A mudança de sentido produz um ciclo de histerese e a sua caracterização varia em relação ao tipo de liga associada a tratamentos térmicos e composição química (Otsuka & Ren, 1999; Wu & Lin, 2000).

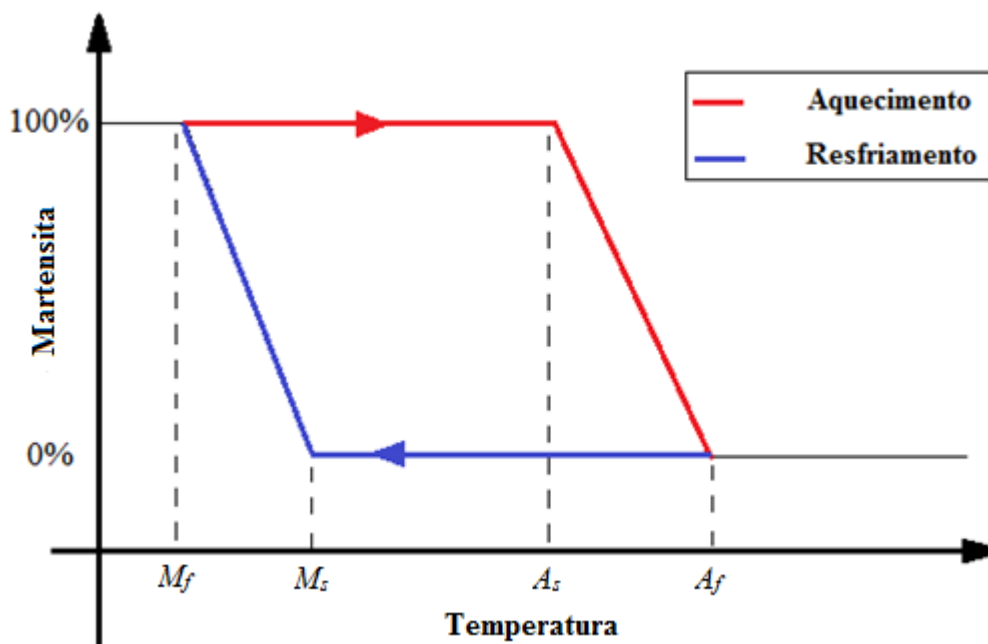


Figura 2.2 – Fração percentual de formação da martensita em função das temperaturas de transformação de fase.

Ainda em relação à Figura 2.2, observa-se que dentro da faixa de temperaturas de transformação considerada, as propriedades termomecânicas das SMA (pseudoelasticidade e quasiplasticidade) são evidenciadas. Abaixo da temperatura de início da formação de martensita, a quasiplasticidade é observada. Acima da temperatura final de formação da austenita, a pseudoelasticidade é observada.

2.2 LIGAS NiTi

As ligas NiTi com memória de forma são compostos intermetálicos que apresentam uma solubilidade moderada tanto de Níquel (Ni), quanto de Titânio (Ti), além de outros elementos metálicos. Apresentam também ductilidade comparável à de outras ligas metálicas (Krishnan et al., 1974). A presença desta solubilidade em função do maior número de elementos permite uma significativa modificação nas propriedades mecânicas, além das temperaturas de transformação de fase (Frenzel et al., 2004).

A Figura 2.3 apresenta o diagrama de fases do sistema NiTi. As ligas que apresentam o comportamento característico de memória de forma são aquelas com composição de 45% de Titânio (Ti) e 55% de Níquel (Ni).

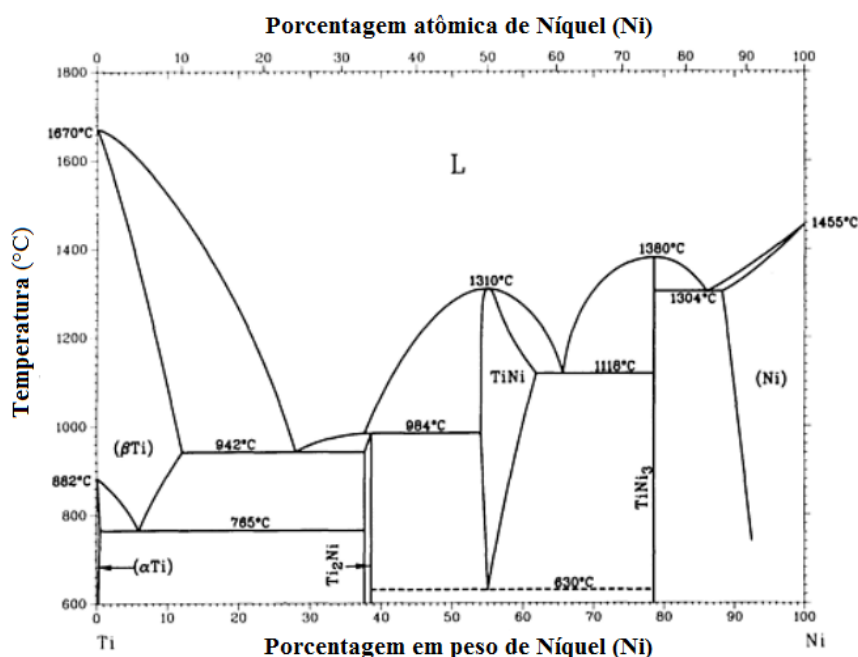


Figura 2.3 – Diagrama de fases NiTi (ASM Handbook. *Alloy Phase Diagrams*, 1992. Modificado).

As modificações produzidas na transformação de fase podem ser frequentemente induzidas a partir da adição de outros elementos como o Ferro (Fe) e o Cromo (Cr) e utilizados para reduzir as temperaturas de transformação, assim como o Cobre (Cu) utilizado para reduzir a histerese de transformação e diminuir a tensão de orientação da martensita (Shaw & Kyriakides et al., 1995). Por outro lado, a presença de alguns elementos de liga deve ser evitada, como o Oxigênio (O) e o carbono (C) que provocam a alteração das temperaturas de transformação e degradam as propriedades mecânicas (Fernandes, 2003).

A elevada reatividade do Titânio (Ti) dificulta o processo de fusão dessas ligas, pois deve ser realizado, preferencialmente, em um ambiente com atmosfera inerte ou a vácuo. Comercialmente, são utilizadas técnicas como a fusão por feixe de elétrons, por arco de plasma ou por indução sob vácuo (Frenzel et al., 2004).

As estruturas obtidas após a fusão podem ser conformadas a quente por laminação, extrusão ou forjamento. Alguns processos de deformação a frio podem ser aplicados, porém, como a capacidade de encruamento desse material é muito acentuada, torna-se necessária a realização de um processo de recozimento. A trefilação é geralmente utilizada para a produção de fios com dimensões de, aproximadamente, 0,05 mm, apresentando excelentes características superficiais. Um dos maiores desafios consiste no desenvolvimento de processos de tratamentos mais adequados para a obtenção das características desejadas (Fernandes, 2003).

A Tabela 2.1 apresenta as principais características mecânicas e térmicas das ligas NiTi com memória de forma.

Tabela 2.1 – Principais propriedades das ligas NiTi com memória de forma (Fernandes, 2003. Modificado).

Propriedades Térmicas			
Propriedade		Valor	Unidade
Ponto de Fusão		$\cong 1300$	[°C]
Densidade		$\cong 6,45$	[g/cm ³]
Resistividade	Austenita	$\cong 100$	[μΩ·cm]
	Martensita	$\cong 70$	
Condutividade Elétrica	Austenita	$\cong 18$	[W/m·K]
	Martensita	$\cong 8,5$	
Capacidade Calorífica		$\cong 400$	[J/kg·K]
Propriedades Mecânicas			
Módulo de Young	Austenita	$\cong 80$	[GPa]
	Martensita	25 ~ 40	
Tensão de Escoamento	Austenita	195 ~ 690	[MPa]
	Martensita	70 ~ 140	
Tensão Máxima de Tração		$\cong 895$	[MPa]
Propriedades Características do Efeito Memória de Forma			
Temperaturas de Transformação		-200 ~ 110	[°C]
Deformação Recuperável		$\cong 8,5$	-

2.2.1 Aplicações das Ligas NiTi

Entre diversas SMA, as ligas NiTi apresentam notável destaque por apresentarem propriedades funcionais, tais como: superelasticidade, efeito memória de forma e elevada capacidade de amortecimento de vibrações mecânicas quando comparadas às demais ligas. Portanto, tais características evidenciam as ligas NiTi em aplicações em várias áreas da engenharia (Humbeeck, 1999).

A primeira aplicação comercial em grande escala das ligas NiTi estão documentadas na década de 1970, em uma peça de acoplamento para unir uma tubulação hidráulica de titânio em uma aeronave Grumman F-14. De maneira geral, outros exemplos que podem-se citar são: conectores elétricos, antenas de aparelhos telefônicos celulares, armações de óculos, vários tipos de atuadores e proteções de construções civis em prédios e pontes contra abalos sísmicos (Humbrecht, 1999).

2.2.1.1 Aplicações na Medicina

As áreas que apresentam maior destaque em aplicações com ligas Ni-Ti são médicas e odontológicas. Dentre diversos materiais comerciais disponíveis, incluindo metais, cerâmicas e ligas, a utilização em aplicações médicas apresenta elevada restrição, uma vez que os materiais necessitam satisfazer dois critérios essenciais: biofuncionalidade e biocompatibilidade. A biofuncionalidade está associada à capacidade do material realizar funções desejadas em um determinado período no interior do corpo, enquanto que a biocompatibilidade está relacionada à capacidade do material não apresentar propriedades tóxicas no período em que se encontra no interior do corpo (Miyazaki, 1998).

Dentre os campos médicos de aplicações das ligas NiTi, o ortopédico é o que apresenta maior destaque na utilização deste material. Exemplos de aplicações são: próteses de articulações ósseas e placas de fixação de ossos fraturados (Fig. 2.4). Cateteres e *stents* utilizados na desobstrução venal em cirurgias cardiovasculares e endoscópios também são exemplos de aplicações médicas.

2.2.1.2 Aplicações na Odontologia

As ligas NiTi no campo odontológico, em substituição ao aço inoxidável, vem conquistando notável espaço. Algumas aplicações importantes são: fios ortodônticos Fig (2.5), implantes e fixadores de próteses dentárias (Miyazaki, 1998).

A Figura 2.5 ilustra como o tratamento ortodôntico é realizado com a utilização de fios ortodônticos de liga NiTi. Em (a) e (c), no início do tratamento, os fios encontram-se consideravelmente flexionados. Em (b) e (d), após dois meses, o resultado evidencia a melhoria provocada com a utilização do material (Quintão, 2000).

2.2.1.3 Aplicações Industriais

Outras aplicações importantes das SMA encontram-se no campo industrial. O efeito memória de forma pode ser visualizado, pelo retorno da forma inicial do material, também em acoplamentos de tubulações de circuitos hidráulicos pela *Raychem Corporation*, como ilustra a Fig.(2.6). Esses acoplamentos tem a geometria semelhante a casquilhos cilíndricos de diâmetro ligeiramente menor ao dos tubos em que desejam-se ligar. Enquanto se encontram no estado martensítico são expandidos à baixa temperatura e quando são aquecidos sofrem uma contração que une as extremidades dos tubos (Fernandes, 2003).

2.2.1.4 Aplicações Automotivas

No campo industrial automobilístico, as SMA têm importantes aplicações em atuadores térmicos. As ligas NiTi são as mais utilizadas nesse tipo de aplicação em relação às outras, como as ligas Cu-Zn-Al, devido às inúmeras vantagens presentes, como por exemplo alta resistividade elétrica, excelente resistência à corrosão e alta resistência mecânica (Stoeckel, 1990).

O princípio de funcionamento de atuadores térmicos está associado a mudanças de forma e/ou a geração de força em função de uma determinada variação de temperatura. Atuadores térmicos de ligas com memória de forma geralmente concorrem nessa área com alguns dispositivos eletrônicos e sistemas pneumáticos ou a vácuo (Stoeckel, 1990). A Figura 2.7 ilustra esquematicamente algumas das principais aplicações de ligas com memória de forma em diversos mecanismos presentes em automóveis.

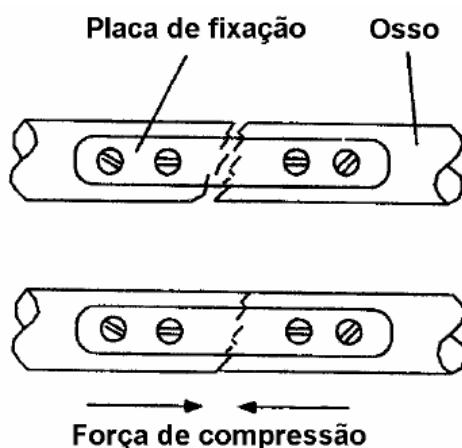


Figura 2.4 – Representação esquemática de atuação de uma liga NiTi utilizada na fixação de ossos fraturados (Dias, 2005).

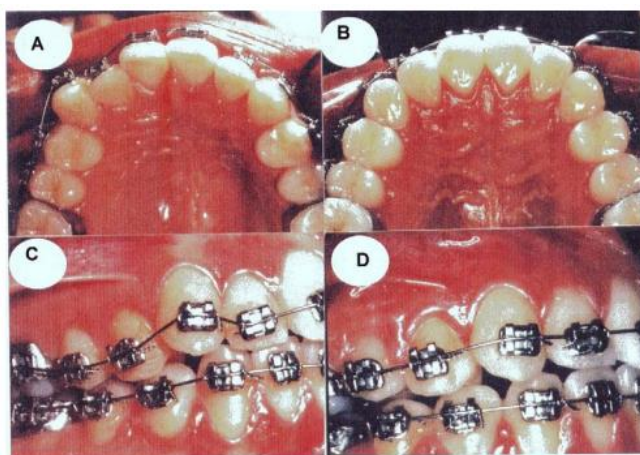


Figura 2.5 – Processo de ação de um fio ortodôntico de liga NiTi (Quintão, 2000).

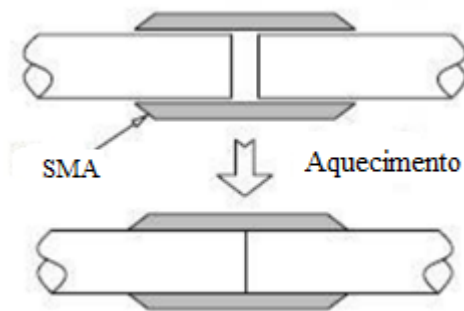


Figura 2.6 – Luva de ligação de tubos: inserção dos tubos, a frio; martensita, ajuste dos tubos devido ao aquecimento da manga, transformação da martensita em austenita (Fernandes, 2003).

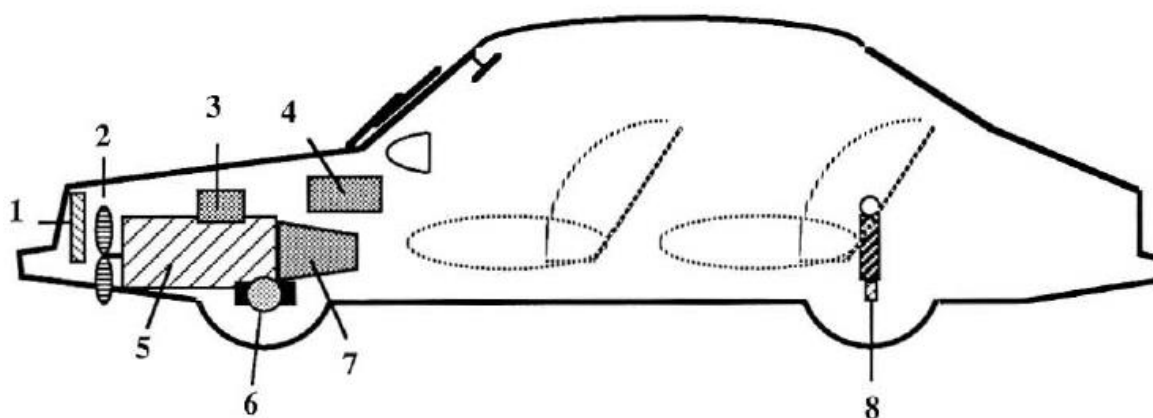


Figura 2.7 – Representação esquemática da aplicação de ligas com memória de forma como atuadores térmicos em um automóvel. (1) Veneza do radiador; (2) Sistema de embreagem; (3) Sistema de controle de combustível; (4) Controle de temperatura; (5) Mecanismos de controle do motor; (6) Resfriamento dos freios; (7) Sistema de transmissão/redução de ruídos; (8) Ajuste de suspensão (Stoeckel, 1990).

2.3 COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DAS SMA

2.3.1 Pseudoelasticidade

A pseudoelasticidade é um comportamento termomecânico das SMA caracterizado por um comportamento elástico após a retirada da carga a temperaturas acima de A_f , ou seja, há uma recuperação da deformação a temperaturas acima de A_f . Essas deformações são provenientes de transformações martensíticas induzidas por tensão e por reorientação da estrutura cristalina do material (Krishnan et al., 1974).

Em uma configuração livre de tensões, a temperaturas acima de A_f , somente a austenita é termodinamicamente estável e, portanto, a martensita induzida por tensão é instável (Delaey et al., 1974). A deformação típica recuperável das ligas NiTi quando comparada às deformações reversíveis de outras SMA, é um aspecto relevante que representa a elevada excentricidade dessas ligas.

A deformação típica recuperável nas ligas NiTi chega a, aproximadamente, 8%, enquanto que para outras ligas essa deformação pseudoelástica pode chegar a até 10% (Wayman & Duerig, 1990).

Quando o material é submetido a uma tração mecânica acima de A_f um comportamento elástico é observado até um determinado nível de tensão, conforme o segmento 1-2 na Fig (2.8).

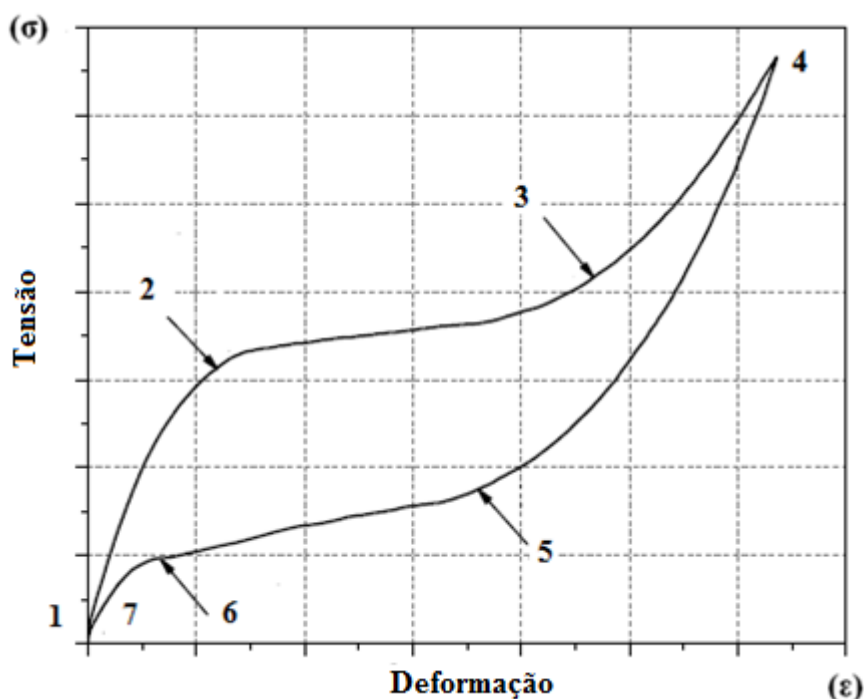


Figura 2.8 – Diagrama tensão-deformação em relação ao comportamento pseudoelástico em uma SMA (Lagoudas, 2008. Modificado).

A partir do ponto 2 da Fig (2.8) o material sofre deformação relativamente elevada para pequena variação de tensão. No segmento 2-3 observa-se uma deformação relativamente grande para uma pequena variação de tensão. Esta deformação está associada a uma transformação martensítica induzida por tensão. No ponto 3 essa transformação é completada e o material volta a se comportar elasticamente até o ponto 4. Com a retirada da carga o material retorna à configuração inicial percorrendo os segmentos 4-5, 5-6 e 6-7, descrevendo assim uma histerese. A esse comportamento dá-se o nome de pseudoelasticidade. Se solicitado acima do ponto 4 o material atingirá o escoamento e irá deformar plasticamente como qualquer outro material.

Um segundo interessante comportamento destaca a importância do estado termomecânico (tensão-temperatura) em análise, conforme ilustra a Figura 2.9.

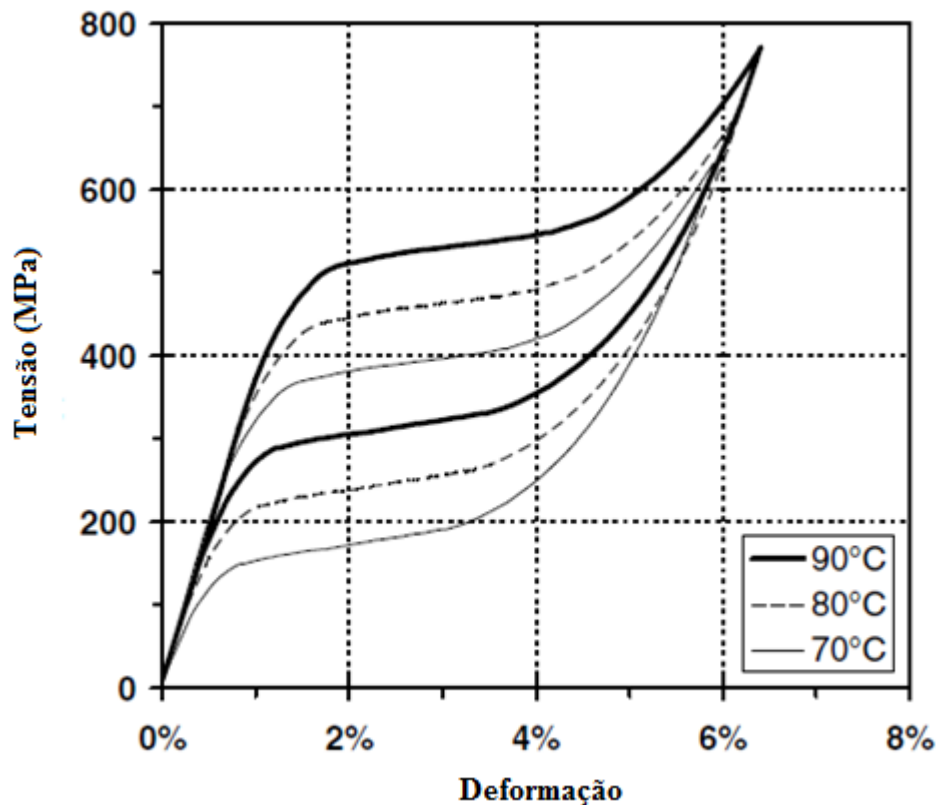


Figura 2.9 – Efeito da variação de temperatura sobre o comportamento pseudoelástico em uma liga NiTi (Lagoudas, 2008. Modificado).

Percebe-se que a curva é ligeiramente deslocada para cima quando há um aumento de temperatura. Porém, permanece no intervalo $A_f < T < T_d$, onde T_d é a temperatura a partir da qual não é mais possível induzir a formação de martensita (Fernandes, 2003).

2.3.2 Quasiplasticidade

Quando a SMA encontra-se a uma temperatura inferior a M_f e livre de tensões, a sua estrutura é martensítica maclada, que é caracterizada por diferentes variantes com diferentes orientações (até 24) formada pelo resfriamento da austenita livre de tensões.

A Figura 2.10 representa a existência de duas variantes. Após a aplicação de uma força de tração, observa-se o comportamento elástico até um determinado nível de tensão crítica (σ_{crit}). Quando a tensão é superior a σ_{crit} há a formação de martensita demaçada, ou seja, observa-se a reorientação da estrutura cristalina da martensita. O processo de reorientação da martensita não envolve deformação plástica (Delaey et al, 1974).

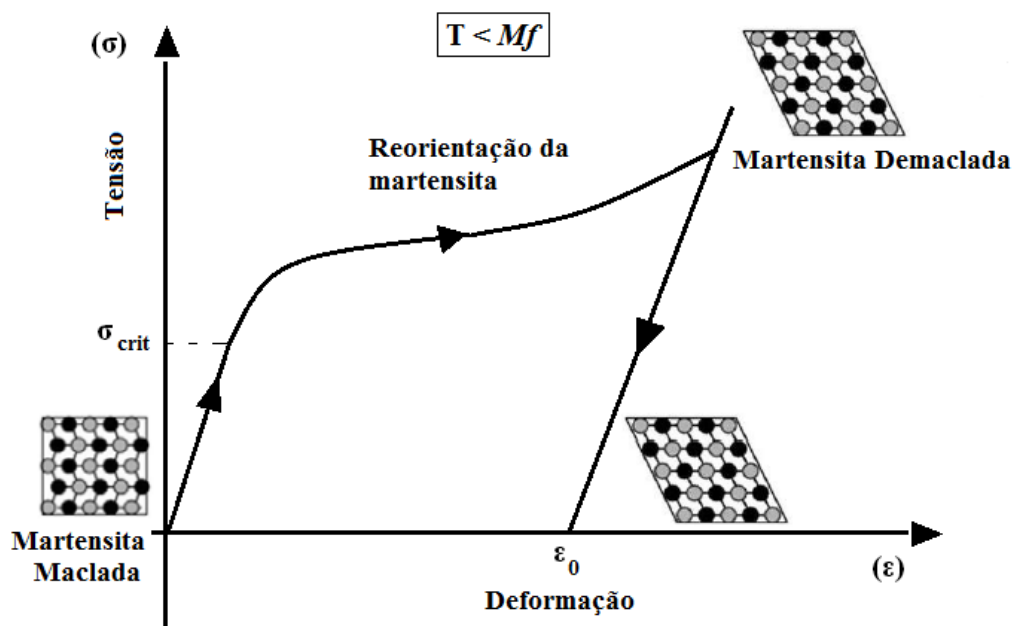


Figura 2.10 – Representação do efeito da quasiplasticidade em um diagrama tensão-deformação.

A deformação recuperável em algumas ligas pode chegar a até 10%. Após o descarregamento, a deformação quasiplástica (ϵ_0) é mantida. Este comportamento é denominado quasiplasticidade.

2.3.3 Efeito Memória de Forma

As ligas com memória de forma exibem o efeito de memória de forma quando são deformadas na fase martensítica maclada e, depois, descarregadas. Estando abaixo de M_f ao serem aquecidas a uma temperatura acima de A_f , retomam sua forma inicial, antes da deformação (Silva & Castilho, 2011). As características do efeito memória de forma podem ser melhor compreendidas através do diagrama tensão-deformação-temperatura, conforme apresentado na Figura 2.11 (Lagoudas, 2008).

A partir da fase mãe (ponto A na figura 2.11), a fase resultante do processo de resfriamento, sem carregamento, da austenita até temperaturas abaixo de M_s e M_f é a martensita maclada (ponto B). Quando uma tensão superior à tensão inicial de deformação (σ_s) é aplicada à martensita maclada, inicia-se o processo de reorientação cristalina, resultando no crescimento de algumas variantes martensíticas que estão sob uma orientação favorável. A reorientação dessas variantes ocorre sob um nível de tensão bem inferior à tensão relativa à deformação plástica permanente da martensita. O processo final de demaclagem ocorre a um nível de tensão (σ_f), caracterizado pela curva superior do diagrama σ - ϵ na figura 2.11. No processo C-D o material é descarregado e a fase martensita demaçada é mantida. No aquecimento, sem a aplicação de carga, a transformação reversa é iniciada à temperatura A_s (ponto E na figura 2.11) e se completa quando a temperatura A_f é alcançada (ponto F na figura 2.11), acima desta temperatura apenas a fase austenítica está presente. Caso nenhuma

deformação plástica tenha ocorrido no processo de demaclagem, a geometria original da SMA é retomada (ponto A na figura 2.11) (Lagoudas, 2008).

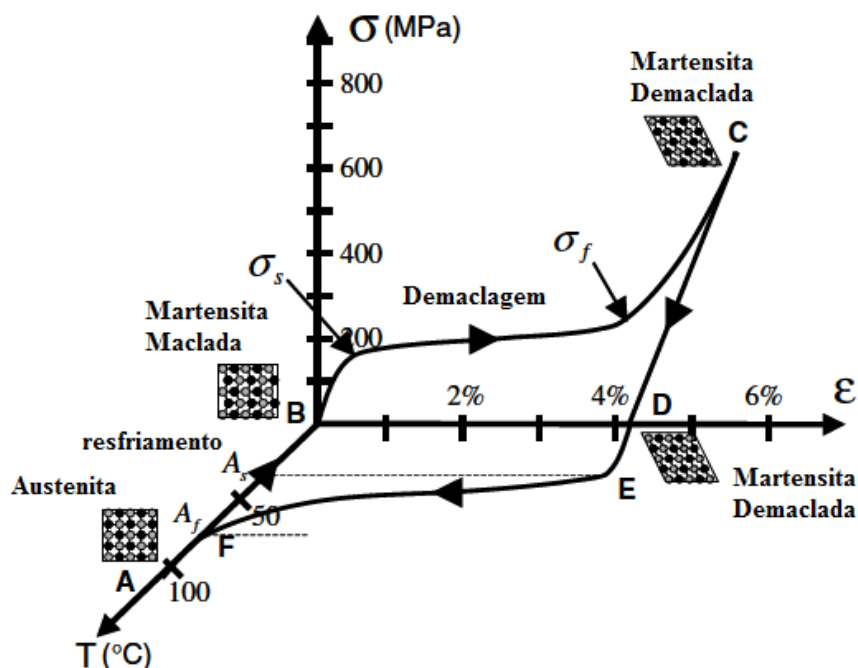


Figura 2.11 – Transformação de fase em uma típica liga NiTi com memória de forma (Lagoudas, 2008. Modificado).

2.4 PROPRIEDADES DAS LIGAS NiTi

As SMA sofrem alterações de propriedades mecânicas como o módulo elástico e o amortecimento em decorrência da mudança de fase. A variação destas propriedades sob o efeito da mudança de temperatura é o principal tema de estudo neste trabalho.

A Figura 2.12 ilustra o comportamento do módulo de elasticidade em função da variação de temperatura entre o intervalo de M_f e A_f para uma liga NiTi com memória de forma. Observa-se que o módulo elástico na fase austenítica é consideravelmente superior em relação à fase martensítica. Em alguns casos, o módulo da austenita chega a ser três vezes maior em relação ao da martensita (Turner, 2000).

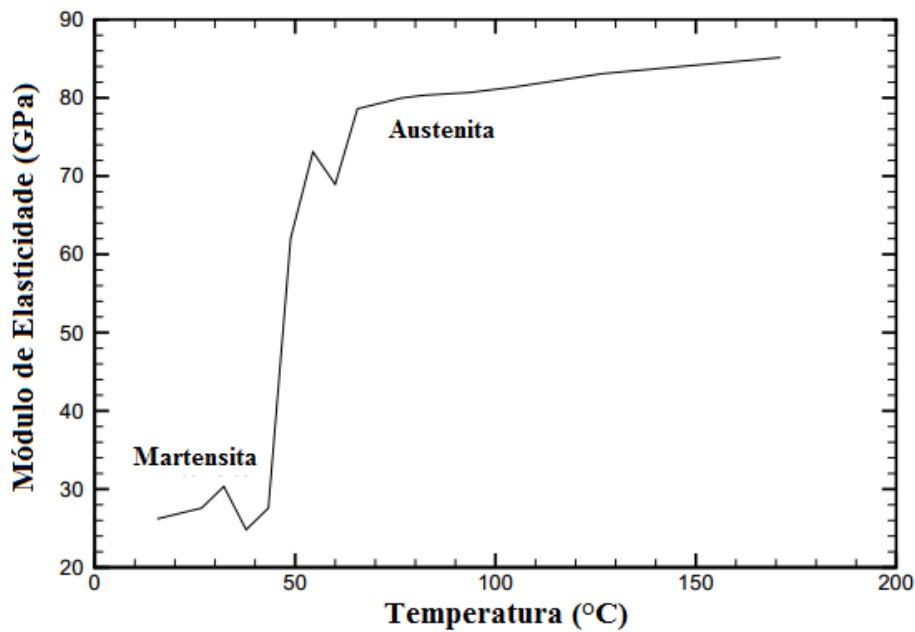


Figura 2.12 – Evolução do módulo elástico em função da temperatura para uma liga NiTi (Turner, 2000. Modificado).

A Figura 2.13 mostra a variação do amortecimento em função da temperatura para uma liga NiTi.

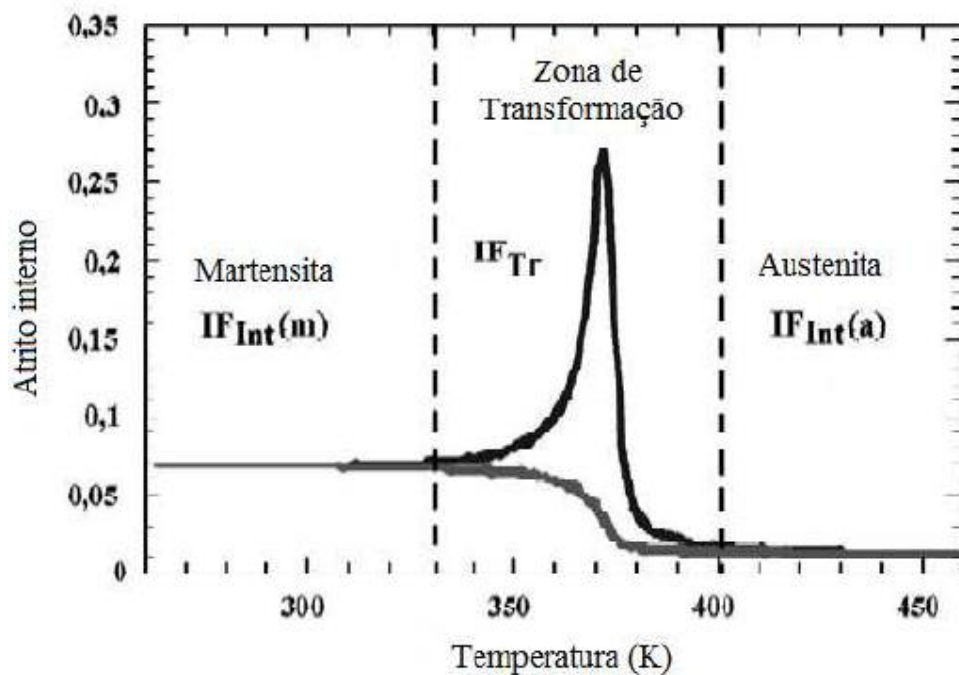


Figura 2.13 – Variação do atrito interno em função da temperatura para uma liga NiTi

2.5 PROPRIEDADES DE ANÁLISE

2.5.1 Amortecimento

2.5.1.1 Amortecimento Interno

O amortecimento interno em materiais metálicos está diretamente relacionado a diversos fenômenos em defeitos microestruturais (Cossolino & Pereira, 2010). Como exemplo, pode-se citar:

- Contornos de grãos e impurezas;
- Discordâncias em materiais metálicos;

O amortecimento interno é geralmente subdividido em dois modelos de representação: amortecimento viscoelástico e amortecimento histerético. Atualmente, a nomenclatura “histerético” é imprópria, uma vez que todos os tipos de amortecimento interno estão associados a efeitos de curvas de histerese (Silva, 2007). Através da curva tensão-deformação o amortecimento é representado pela área delimitada por esta curva, como ilustra a Figura 2.14.

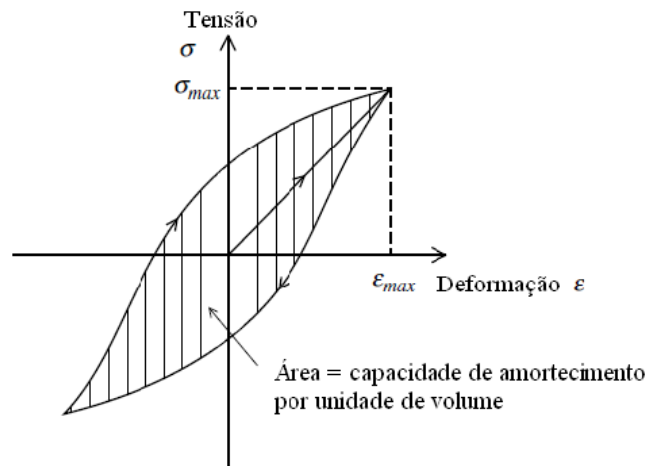


Figura 2.14 – Curva de histerese típica para amortecimento mecânico (Silva, 2007).

Na Figura 2.14, a área hachurada, ou área de histerese, representa a dissipação de energia por unidade de volume do material através do ciclo de carregamento, ou seja, a capacidade de amortecimento do material. (Silva, 2007). Matematicamente, denota-se por d a capacidade de amortecimento por unidade de volume que é dada pela Eq. (1):

$$d = \oint \sigma d\varepsilon. \quad (1)$$

Em qualquer dispositivo mecânico amortecedor, há uma curva de histerese correspondente. Neste caso, o trabalho realizado pela força de amortecimento é dado como sendo a integral cíclica da força e o respectivo deslocamento, que corresponde à área da curva de histerese. Portanto, a energia dissipada a cada ciclo de movimento é igual a esta integral. Ou seja, a capacidade de amortecimento quando dividida pelo volume do material, fornece a capacidade de amortecimento por unidade de volume (Silva, 2007).

2.5.1.2 Amortecimento Viscoelástico

O movimento de um sistema pode ser descrito a partir de equações diferenciais, baseadas na Lei de Newton, que envolvem parâmetros variáveis no tempo. Os sistemas são classificados quanto ao número de coordenadas independentes que são necessárias para descrever o movimento, ou seja, quanto ao número de graus de liberdade (GDL) (Almeida, 2005).

O amortecimento viscoelástico é de natureza viscosa e a força de amortecimento, que se opõe ao movimento, é proporcional à velocidade, sendo escrita como:

$$F = -c\dot{x},$$

onde c é a constante de amortecimento (ou constante de proporcionalidade) e \dot{x} é a velocidade de deslocamento da massa em relação a um referencial fixo.

O movimento de um sistema com amortecimento viscoelástico pode ser esquematizado por um sistema massa-mola-amortecedor viscoso de parâmetros concentrados, conforme ilustrado na Fig. (2.15). Este é um modelo simplificado de um sistema real com um grau de liberdade, como por exemplo, um pistão dentro de um cilindro preenchido com um líquido (Silva, 2007).

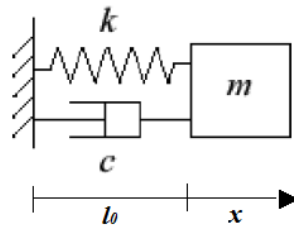


Figura 2.15 – Representação esquemática de um sistema massa-mola-amortecedor com parâmetros concentrados.

Sendo m é a massa do sistema, k a constante elástica da mola e c a constante de amortecimento viscoso, pode-se representar, matematicamente, o movimento sem forçamento externo deste sistema pela seguinte equação:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx. \quad (2)$$

Reescrevendo esta equação, obtém-se:

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x. \quad (3)$$

Definindo-se,

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}, \quad (5)$$

onde, ω_0 representa a frequência natural do sistema, ou seja, a frequência na qual o sistema oscila sem forçamento externo e sem amortecimento viscoso e ζ representa o fator de amortecimento, ou a taxa de amortecimento presente no sistema.

Substituindo os termos (4) e (5) na equação (3), obtém-se:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0 \quad (6)$$

Supondo solução do tipo (Thorby, 2008):

$$x = e^{\gamma t}, \quad (7)$$

Chega-se a γ descrito por,

$$\gamma = \omega_0 \left(-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1} \right) \quad (8)$$

Desta forma, o comportamento oscilatório do sistema depende da Equação (8) e, consequentemente, do valor de γ . A classificação do movimento é realizada considerando o valor de ζ , conforme descrito abaixo.

- Quando $\zeta > 1$, há duas soluções reais e o sistema é chamado de superamortecido;
- Quando $\zeta = 1$, há uma solução real e o sistema é chamado de criticamente amortecido;
- Quando $0 \leq \zeta < 1$, há duas soluções complexas e o sistema é chamado de sub-amortecido.

Considerando que o presente estudo toma como análise a oscilação livre de um corpo de prova, os casos superamortecido e criticamente amortecido não serão avaliados, uma vez que o sistema não oscila nessas condições. A Figura 2.16 apresenta a variação de amplitude do movimento em função do tempo em relação a todas as condições para o fator de amortecimento, inclusive para o caso não-amortecido, no qual $\zeta = 0$.

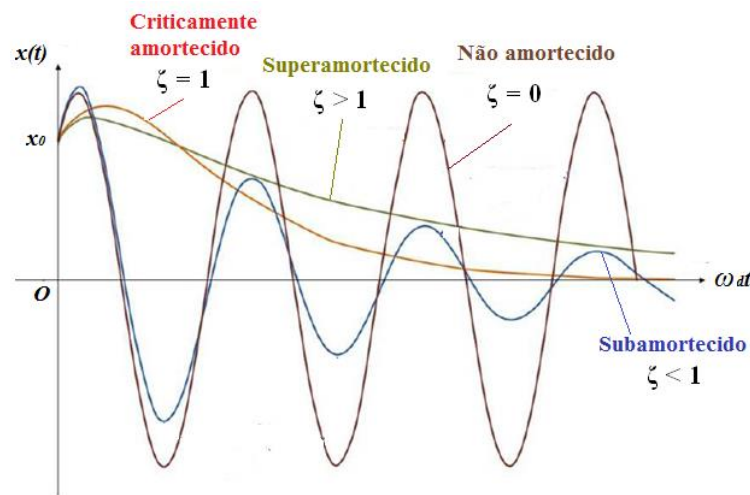


Figura 2.16 – Representação esquemática entre os diferentes tipos de movimento em relação ao fator de amortecimento (Cossolino & Pereira, 2010).

2.5.2 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade (ou módulo elástico) é uma propriedade mecânica utilizada para caracterizar determinado material em relação a sua rigidez mecânica ou a sua resistência à deformação elástica. É um importante termo na análise de projetos em cálculos de flexões elásticas. (Callister,

1998). O grau na qual uma determinada estrutura é deformada depende da magnitude da tensão imposta. Para a maioria dos metais que são submetidos a tensões de tração relativamente baixas, a tensão e a deformação são diretamente proporcionais entre si e relacionadas segundo a Eq.(9) abaixo,

$$\sigma = E\varepsilon \quad (9)$$

Esta relação é chamada de lei de Hooke e a constante de proporcionalidade E (GPa ou psi) é o módulo de elasticidade, módulo de Young. Em uma escala atômica, quanto maior são as forças de atração entre os átomos, maior é o módulo de elasticidade. (Callister, 1998; Van Vlack, 2000).

O processo no qual a tensão e a deformação são proporcionais é chamado de deformação elástica. A representação dessa relação é mostrada na Fig. (2.17). A partir dela pode-se perceber que a deformação elástica não é permanente, ou seja, após a aplicação e liberação da carga, a peça retorna à sua geometria original. A aplicação da carga corresponde ao movimento ascendente a partir da origem e ao longo da linha reta. A liberação da carga corresponde ao movimento descendente, na direção oposta, voltando à origem (Callister, 1998; Van Vlack, 2000).

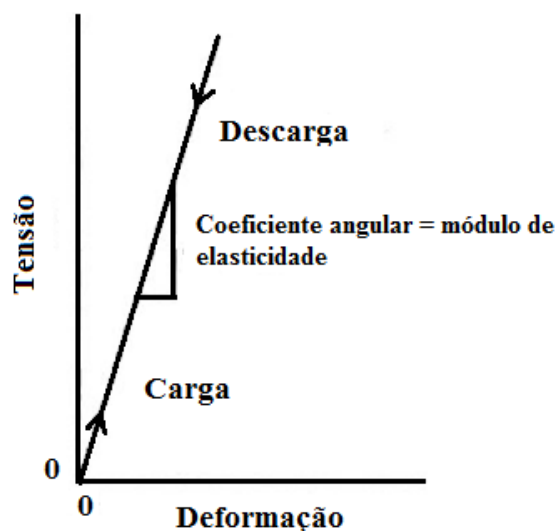


Figura 2.17 – Diagrama de tensão-deformação em regime elástico (Callister, 1998).

Existem alguns materiais (por exemplo, ferro fundido cinzento, concreto e muitos polímeros) para os quais a relação entre deformação e tensão é não linear, neste caso utiliza-se o *módulo tangencial* ou *módulo secante*, representados na Fig. (2.18). O módulo tangencial é tomado como sendo a inclinação da curva tensão-deformação para um determinado nível de tensão específico, já o módulo secante é definido pela inclinação de uma reta secante desde o ponto de origem até um determinado ponto da curva tensão-deformação (Callister, 1998).

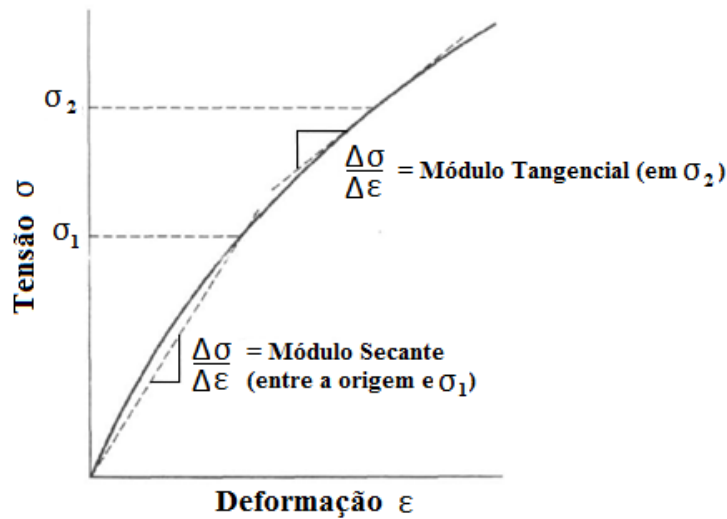


Figura 2.18 – Diagrama de tensão-deformação em regime elástico não-linear e determinação dos módulos tangencial e secante (Callister, 1998. Modificado).

Em uma escala atômica, a deformação elástica macroscópica é manifestada por pequenas alterações de espaçamento e extensão interatômicas. Consequentemente, o módulo de elasticidade é uma medida de resistência à separação entre átomos adjacentes, ou seja, às forças de ligações interatômicas (Callister, 1998). O módulo de elasticidade E é proporcional à inclinação da curva força interatômica (dF) e a separação interatômica (dr):

$$E \propto \left(\frac{dF}{dr} \right)_{r_0} \quad (10)$$

A Figura 2.19 representa a força-separação para materiais que possuem ligações interatômicas tanto forte quanto fracas. A inclinação das curvas na separação interatômica de equilíbrio r_0 para cada tipo de ligação também é mostrada.

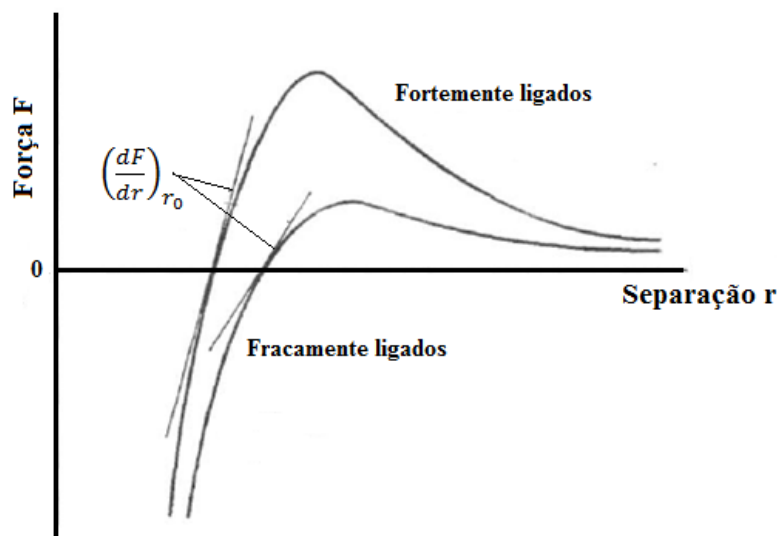


Figura 2.19 – Relação de força-separação de ligações interatômicas fortes e fracas. (Callister, 1998).

2.5.3 Temperaturas de Transformação de Fase

Uma das principais preocupações ao se trabalhar com ligas com memória de forma é a determinação das temperaturas de transformação de fase (M_s , M_f , A_s e A_f) e da fase R, caso ocorra. As propriedades físicas das ligas NiTi variam de acordo com a quantidade de cada fase presente no material, e esta por sua vez, é função da temperatura da liga (Villarinho, 2010). Portanto, uma maneira de medir a temperatura em que uma fase dá lugar à outra é realizar a medição de alguma propriedade física do material diretamente relacionada à quantidade de fase presente ao longo de determinada faixa de temperatura. Existem, pelo menos, dez propriedades diferentes que podem ser relacionadas à transformação de fase embora nem todas sejam de fácil medição ou suficientemente precisas para o fim científico (Hogdson & Brown, 2000).

A maneira mais simples para estimar as temperaturas de transformação de fase é pela variação de temperatura do corpo em função da aplicação de carregamento constante a ele. Quando o alongamento do corpo começa a diminuir é o momento de início da transformação austenítica e quando o corpo tende a retornar a geometria inicial antes da deformação (Villarinho, 2010).

Outra forma comumente utilizada é na determinação das temperaturas de transformação de fase através da medição da resistividade elétrica da liga. Porém, devido à baixa precisão dos resultados e da dificuldade na preparação das amostras, esse tipo de ensaio vem sendo substituído por outros, particularmente pelo DSC (*Differential Scanning Calorimeter*). Esta técnica de ensaio será explicada adiante de forma mais precisa.

As temperaturas de transformação de fase em ligas NiTi estão diretamente associadas à composição das ligas e de tratamentos térmicos sofridos durante o processo de fabricação (Thompson, 2000). Qualquer adição de níquel até o limite de 50%, em peso atômico, tem pouca influência na temperatura de transformação, entretanto, acima deste valor, pequenas adições de níquel podem mudar significativamente a temperatura de transformação e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas da liga (Hogdson & Brown, 2000, Libenson et al., 1993). Por exemplo, uma adição de níquel suficiente para mudar a composição da liga NiTi de 50-50 para 51-49 em percentual atômico faz baixar a temperatura de início da formação de austenita (A_s) em, aproximadamente, 100°C e praticamente triplicar a tensão de escoamento (Hogdson & Brown, 2000).

2.5.4 Caracterização de Módulo de Elasticidade e de Amortecimento

Os módulos de elasticidade podem ser caracterizados através de três principais métodos: quase-estáticos, dinâmicos ou por ultra-som. Os métodos quase-estáticos (ou isotérmicos) são caracterizados em ensaios mecânicos usualmente destrutivos. Os métodos dinâmicos (adiabáticos) são baseados em técnicas de ressonância não destrutivas (Cossolino & Pereira, 2010). Os valores encontrados variam em função do método utilizado. Para os métodos dinâmicos, os valores são maiores em relação aos métodos estáticos em um percentual típico de, aproximadamente, 0,5% para metais. Para outros materiais, esta diferença pode ser ainda maior dependendo dos efeitos anelásticos presentes

(Cossolino & Pereira, 2010). A proposta para o presente estudo é a verificação do módulo de elasticidade e amortecimento em função do aumento de temperatura para o qual a amostra é submetida, iniciando em uma temperatura abaixo da temperatura ambiente.

2.5.5 Técnica de Excitação por Impulso

A técnica de excitação por impulso (*Impulse Excitation Technique*) consiste em um ensaio não destrutivo para a caracterização dos módulos de elasticidade dinâmicos e do amortecimento de materiais através da análise das frequências naturais de vibração (ATCP Engenharia Física).

O principal objetivo desta técnica é a medição de forma não destrutiva dos seguintes parâmetros:

- O módulo de Young (E);
- O módulo de cisalhamento (G);
- A razão de Poisson (ν);
- O amortecimento (ζ).

A partir desses módulos e do amortecimento, também é possível realizar a caracterização de outras grandezas:

- O módulo de elasticidade volumétrico (K);
- Os módulos de elasticidade de materiais anisotrópicos em determinadas direções;
- O módulo de elasticidade complexo (E^*);
- O fator de dissipação $\tan(\delta)$;
- A velocidade longitudinal do som (V_l);
- A velocidade transversal do som (V_s).

Como esta técnica é baseada em ensaios não destrutivos, a manipulação do material pode ser realizada de forma repetitiva e intercalada com outros procedimentos, como por exemplo, tratamentos térmicos (ATCP Engenharia Física).

No caso do presente estudo, será realizada a análise somente dos módulos de elasticidade (Young e cisalhamento) e do amortecimento através da técnica de excitação por impulso.

2.5.5.1 Frequências Naturais

A frequência natural ou frequência fundamental de vibração é definida como sendo a frequência na qual um sistema oscila, após uma perturbação inicial, sem a ação de nenhum forçamento externo (Rao, 2008). Essa frequência é uma característica fundamental do sistema e está diretamente associada com a massa e a rigidez. A massa (m) está relacionada ao ganho ou a perda de energia cinética e a rigidez (k) está associada ao ganho ou a perda de energia potencial elástica do sistema (Rao, 2008). Um sistema vibratório com n graus de liberdade terá, em geral, n frequências naturais de vibração.

2.5.5.2 Método do Decremento Logarítmico

O decremento logarítmico, que é consequência de um simples impulso provocado no sistema (em vibração livre) é obtido através da razão entre duas amplitudes sucessivas do sinal (Cossolino & Pereira, 2010). A redução da taxa logarítmica está diretamente relacionada ao nome decremento e ao fato do movimento oscilatório diminuir ao longo do tempo, pois a energia associada é transferida para outras partes do sistema ou é absorvida pelo próprio elemento. O método do decremento logarítmico representa a principal forma de cálculo do amortecimento (Cossolino & Pereira, 2010).

Quando um sistema com 1 grau de liberdade e viscosamente amortecido é excitado por um impulso (Técnica de Excitação por Impulso via Sonelastic®) sua resposta vem na forma de decaimento em função do tempo transcorrido Fig. (2.20).

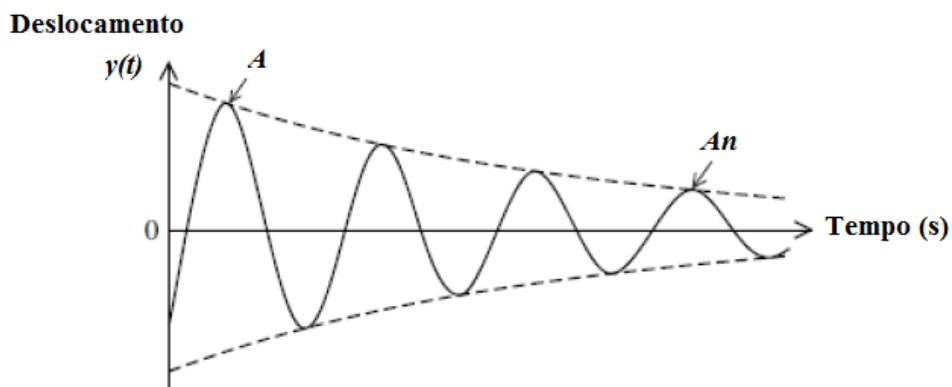


Figura 2.20 – Resposta ao impulso para um oscilador com 1 grau de liberdade (Cossolino & Pereira, 2010. Modificado).

O deslocamento $y(t)$ é dado através da Eq. 11:

$$y(t) = ye^{-\zeta\omega_0 t} \sin(\omega_d t). \quad (11)$$

onde a frequência natural amortecida (ω_d) é determinada através da Eq. 12:

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}. \quad (12)$$

Se a resposta no tempo $t = t_n$ é denotada por y , e a resposta no tempo $t = t + 2\pi r / \omega_d$ é denotada por y_n , então, da Eq. 11, tem-se:

$$\frac{y_n}{y} = \exp\left(-\zeta \frac{\omega_0}{\omega_d} 2\pi r\right). \quad (13)$$

Supondo que y corresponde a um ponto no decaimento da função com magnitude igual a A , e que y_n corresponde ao pico, r ciclos mais tarde, com magnitude A_n . Logo, tem-se que:

$$\frac{A_n}{A} = \exp\left(-\zeta \frac{\omega_0}{\omega_d} 2\pi r\right) = \exp\left[-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} 2\pi r\right]. \quad (14)$$

Desta forma, o decremento logarítmico (δ) é obtido por:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{A}{A_n} \right) = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}. \quad (15)$$

Em termos do amortecimento (ζ), tem-se que:

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi/\delta)^2}}. \quad (16)$$

Quando o amortecimento é baixo ($\zeta < 0,1$), a frequência natural amortecida (ω_d) é praticamente igual à frequência natural de oscilação (ω_0), e então a Eq. 15 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{A_n}{A} \cong \exp(-\zeta 2\pi r). \quad (17)$$

ou ainda,

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{A}{A_n} \right) = \frac{\delta}{2\pi}, \text{ para } \zeta < 0,1 \quad (18)$$

A Figura 2.21 apresenta os principais conceitos referentes à determinação do amortecimento pelo método do decremento logarítmico.

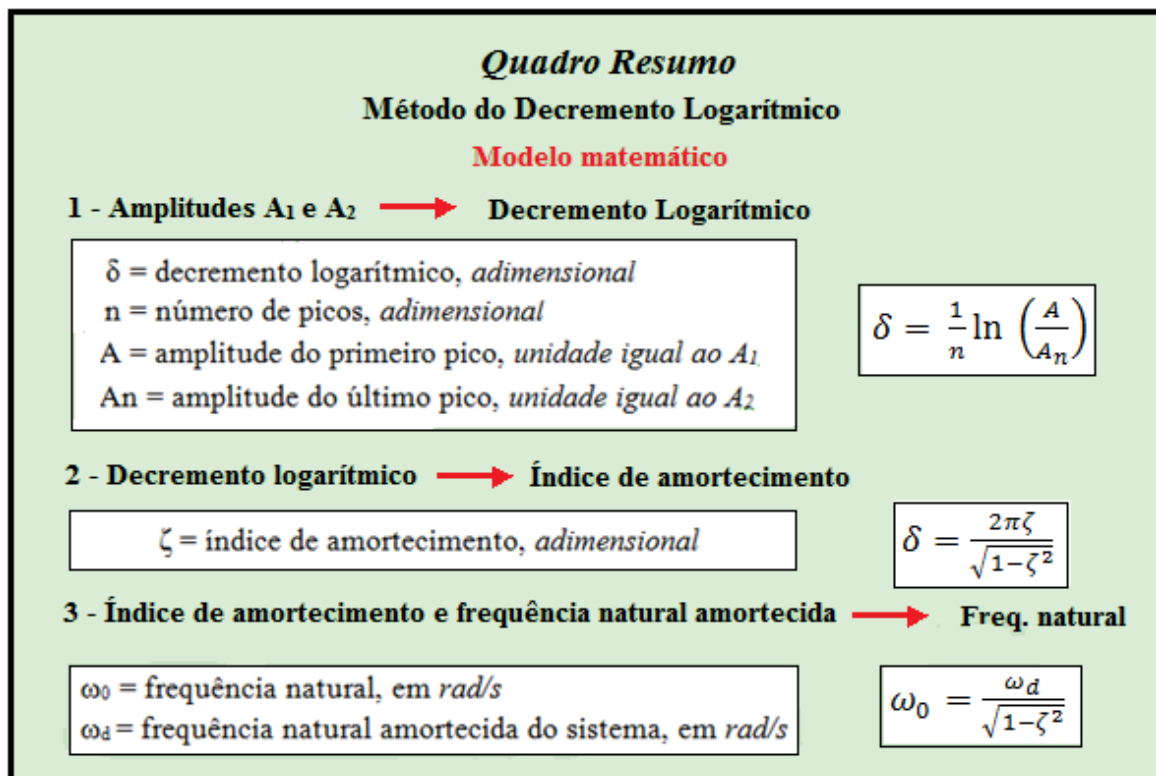


Figura 2.21 – Quadro resumo com os principais conceitos para a determinação do amortecimento pelo método do decremento logarítmico (Cossolino & Pereira, 2010. Modificado).

2.5.5.3 Método da Largura de Banda

Neste método a medida do amortecimento é baseada na resposta da frequência. A largura de banda (meia potência) é definida como a largura da curva da resposta de frequência quando a magnitude (Q) é $(1/\sqrt{2})$ vezes o valor do pico (Silva, 2007). Este valor é denotado por $\Delta\omega$, conforme ilustra a Figura 2.22.

O valor $\Delta\omega$ está relacionado com o amortecimento ζ da seguinte forma:

$$\Delta\omega = 2\zeta\omega_0 = 2\zeta\omega_r. \quad (19)$$

E, portanto, a estimativa para o amortecimento pode ser realizado através da largura de banda, utilizando a relação:

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_r} \quad (20)$$

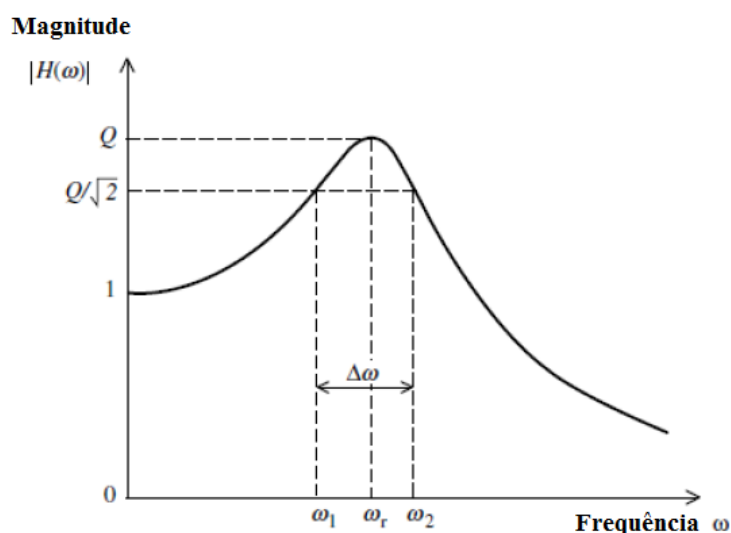


Figura 2.22 – Método da largura de banda para a determinação do amortecimento em um sistema com 1 grau de liberdade (Silva, 2007. Modificado).

2.6 TRATAMENTOS CRIOGÊNICOS

O tratamento criogênico tem sido utilizado para melhorar a resistência ao desgaste e durabilidade de aços ferramenta. O resfriamento é um método eficaz de aumentar a dureza e produzir alto benefício sobre a estrutura cristalina do metal. Algumas vantagens observadas para esse tipo de tratamento são bastante consideráveis, como uma maior vida de ferramentas e um aumento significativo da resistência a abrasão. A temperatura e o tempo de encharque na qual o material fica submetido durante o tratamento são aspectos importantes para essas vantagens (Yun & Xiaoping, 2008).

Durante muito tempo o tratamento criogênico foi cercado por questões duvidosas quanto a sua eficácia na melhoria em propriedades mecânicas dos materiais. A sua aplicação foi fundamentalmente empírica, baseada na experiência. Praticamente não houve investigação aprofundada em torno deste assunto e sabe-se muito pouco acerca do que ocorre nos materiais sujeitos a temperaturas criogênicas

(Sartori et al, 2006). Perante a clara evidência de resultados, atualmente há um crescente aumento no número de estudos relacionados aos processos criogênicos e um notável esforço de investigação. (Leskovsec et al, 2006).

Há diversas formas e técnicas de se realizar tratamento a frio nos materiais, uma vez que "frio" pode ser entendido como temperaturas menores que a temperatura ambiente. De acordo com Bryson (1999), a classificação de tratamentos a frio em materiais é realizada por:

- Tratamento Criogênico – de alguns minutos a algumas horas em até -196°C por exposição rápida ao nitrogênio líquido (N_2L);
- Tratamento Sub-zero – de alguns minutos a algumas horas em até -80°C por exposição ao gelo seco de CO_2 ;
- Tratamento Criogênico Profundo (DCT) – resfriamento lento, dezenas de horas em até -196°C por exposição lenta e controlada ao gás resfriado obtido da evaporação do N_2L e aquecimento lento e controlado.

O tratamento sub-zero é o mais comumente utilizado atualmente em relação aos tratamentos a frio. Suas principais aplicações são na indústria em processos de laminação, forja, austenitização e extrusão, onde garante maior estabilidade dimensional e remoção de tensões residuais. É conhecida por complementar o revenimento e remover alterações dimensionais da têmpera. Esse tratamento também representa o de menor investimento inicial (Ashiuchi, 2009).

Em relação ao Tratamento Criogênico Profundo (*Deep Cryogenic Treatment* – DCT) seu princípio baseia-se no resfriamento a baixa taxa, a partir da temperatura ambiente até a temperatura do nitrogênio líquido. O ciclo de criogenia pode ser feito em atmosfera gasosa de nitrogênio ou por imersão direta no líquido. Normalmente, esse resfriamento é mantido durante 24 horas (podendo ser superior) e depois retorna à temperatura ambiente, também menores taxas. Isso evita mudanças bruscas de temperatura que possam provocar o aparecimento de trincas e tensões internas. É comum a combinação de criogenia com ciclos de revenimento, que podem ser simples ou múltiplos, obtendo-se diferentes resultados finais (Carlson, 1969; Albert, 1992).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a descrição detalhada sobre o material a ser ensaiado e o método utilizado para o desenvolvimento e caracterização do ensaio pela Técnica de Excitação por Impulso.

3.1 ANÁLISE DO MATERIAL

O material analisado neste estudo é uma liga NiTi na qual, em temperatura ambiente, encontra-se na fase martensítica, apresentando, portanto, o efeito memória de forma. A nomenclatura utilizada para as amostras sem tratamento criogênico e com tratamento são: Amostra_1 e Amostra_2, respectivamente. A Figura 3.1 ilustra a liga Ni₅₅Ti₄₅ (wt%) utilizada nos ensaios.



Figura 3.1 - Liga Ni₅₅Ti₄₅ (wt%) utilizada.

A composição química percentual (em peso % pp) deste material obtida a partir do ensaio de EDX (Espectroscopia por Fluorescência de Raio – X) é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química das ligas NiTi em estudo (Da Silva et al, 2014).

Composição química	Ni	Ti	Al	Fe	Ca	Si
% pp	55,408	43,888	0,295	0,157	0,143	0,109

As temperaturas de transformação de fase para a Amostra_1 e Amostra_2 foram obtidas através do ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) e estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Temperaturas de transformação de fase para as ligas NiTi em estudo (Da Silva et al, 2014).

Amostra	A _s (°C)	A _f (°C)	M _s (°C)	M _f (°C)
A _{ST}	57,01	74,80	41,41	15,65

3.2 O TRATAMENTO CRIOGÊNICO

A amostra utilizada neste estudo foi submetida a tratamento criogênico brusco, ou seja, foi imersa diretamente em nitrogênio líquido a -196°C e mantida nesta temperatura por 8 horas. Após o término do tempo de encharque, a amostra foi retirada e aquecida naturalmente a temperatura ambiente. O ensaio através da Técnica de Excitação por Impulso foi, então, iniciado. A imersão do corpo de prova em um recipiente específico em nitrogênio líquido e o armazenamento do mesmo estão ilustrados na Figura 3.2.

A Figura 3.3 representa esquematicamente como a temperatura varia em relação ao tempo de encharque de 8 horas para o tratamento criogênico utilizado neste estudo. É importante salientar que a Fig. 3.3 é somente ilustrativa e não considera as taxas de aquecimento e resfriamento.



Figura 3.2 - Reservatório para armazenamento de nitrogênio líquido e recipiente para imersão de corpos de prova.

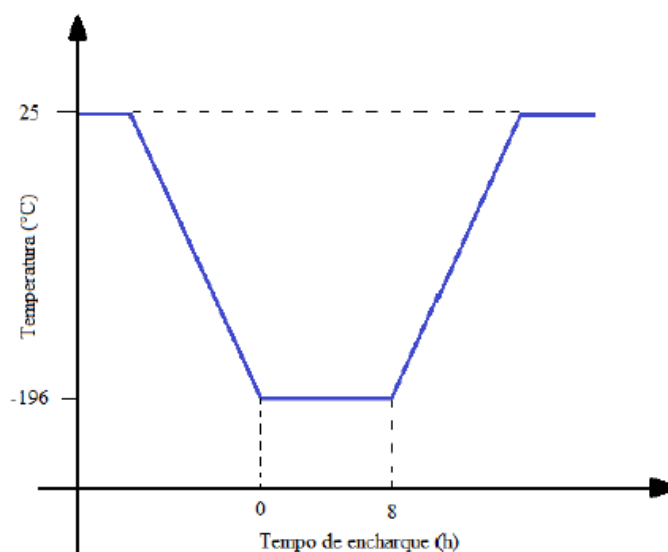


Figura 3.3 - Temperatura e tempo de encharque para o tratamento criogênico da Amostra_2.

3.3 EQUIPAMENTO DE ENSAIO - SONELASTIC®

O instrumento de ensaio utilizado foi o *Sonelastic® Crio* e os dados coletados foram obtidos através do software *Sonelastic® Versão 2.2*, conforme ilustram as Figura 3.4 e 3.5. Todos os experimentos realizados por meio deste equipamento estão baseados na norma ASTM E-1876 e correlatas.

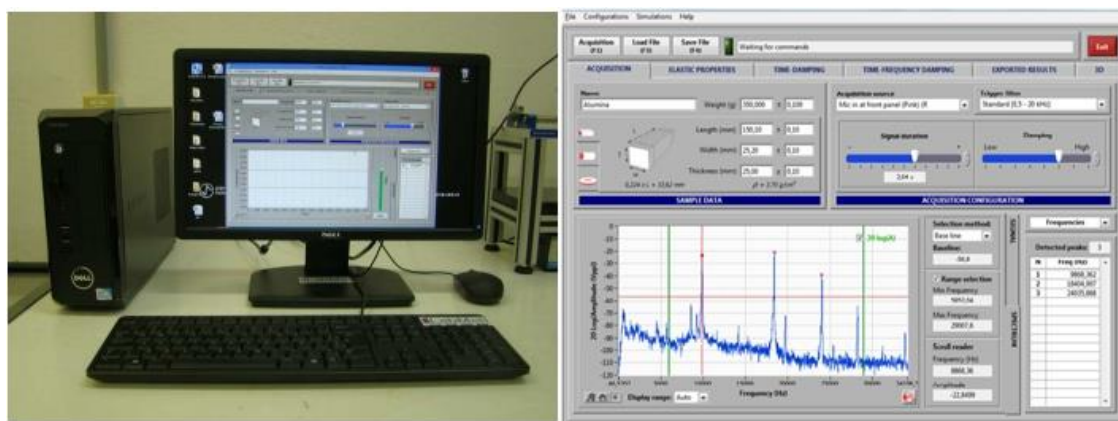


Figura 3.4 – Software *Sonelastic®* versão 2.2.

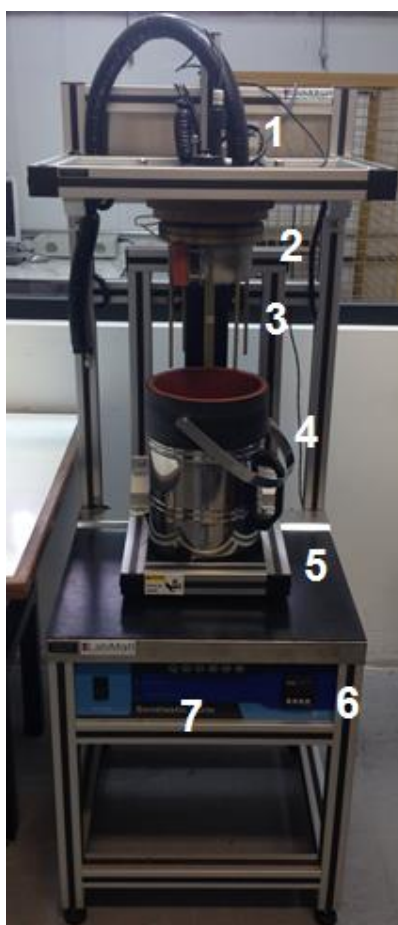


Figura 3.5 – *Sonelastic® Crio*; 1: Núcleo de excitação e captação de sinal; 2: Câmara de aquecimento onde se encontra o corpo de prova; 3: Varetas de condução de calor; 4: Recipiente para armazenamento do nitrogênio líquido; 5: Elevador; 6: Controlador de temperatura; 7: Controlador do elevador.

A metodologia de ensaio consiste na obtenção do módulo elástico e do amortecimento em função da variação de temperatura observada através do equipamento. O módulo elástico e o amortecimento são determinados através da excitação, vibração e detecção das frequências naturais de vibração para o modo flexional no qual a amostra está vibrando.

O equipamento consiste, basicamente, de um microfone (transdutor) para a captação acústica da excitação por impulso, um pulsador eletromagnético automático para a excitação da amostra através de um impacto e a estrutura de suporte que dá sustentação ao corpo de prova e realiza o controle de temperatura programado.

A aquisição do sinal é realizada através de um núcleo de excitação e captação, de altura regulável para o correto posicionamento tanto do microfone quanto do pulsador em relação ao corpo de prova, conforme ilustra a Figura 3.6.



Figura 3.6 – Detalhe do núcleo de excitação e captação de sinal.

A sustentação do corpo de prova é realizada através de um suporte próprio e ajustável próximo ao núcleo de excitação e captação do sinal acústico. A amostra é sustentada por fios metálicos de cobre com tensão regulável de maneira que este possa vibrar da forma mais livre possível e de acordo com as condições de contorno do modo de vibração flexional fundamental. Para isso, é necessário que o corpo de prova esteja apoiado sobre os fios metálicos a uma distância igual a $0,224L$ em relação às suas extremidades, onde L é o comprimento médio da amostra. A determinação desta localização é realizada automaticamente pelo software a partir dos dados dimensionais do corpo de prova. A Figura 3.7 representa detalhadamente o suporte para sustentação da amostra.

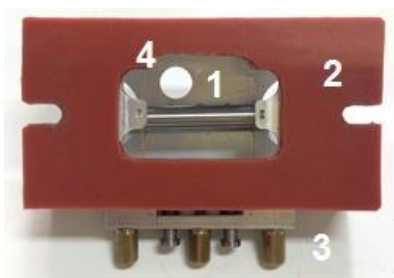


Figura 3.7 – Suporte para sustentação da amostra; 1: Amostra; 2: Orifício para fixação do suporte; 3: Ajuste de tensão dos fios metálicos de cobre; 4: Orifício para passagem da vareta de condução.

O princípio de funcionamento do equipamento é apresentado conforme ilustra a Figura 3.8. Nela, são apresentados dois gráficos. O gráfico 1 representa a resposta em decaimento logarítmico, proveniente do impulso provocado no sistema. A partir desta curva pode-se obter o amortecimento. O gráfico 2 ilustra a curva referente às frequências naturais de vibração provenientes do impulso mecânico transformado em sinal elétrico no sistema. O módulo elástico é determinado a partir de relações matemáticas existentes entre as frequências naturais e variam em função das dimensões geométricas e da massa do corpo de prova em estudo.

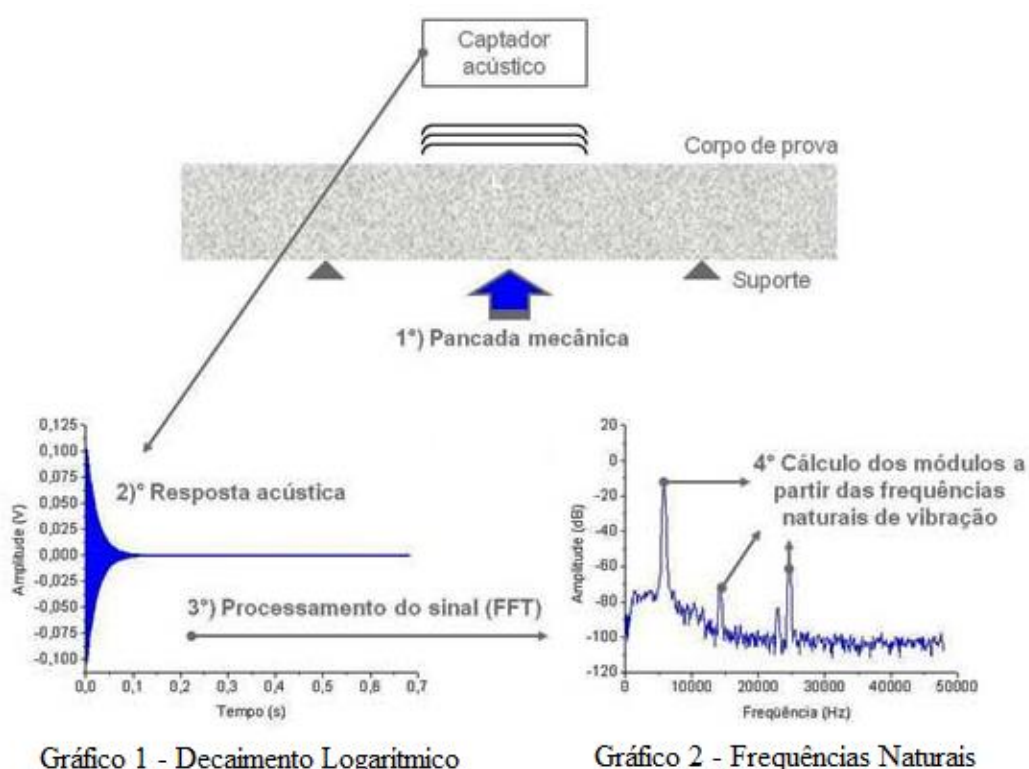


Figura 3.8 – Princípio básico de funcionamento do Sonelastic® (ATCP Engenharia Física. Modificado).

3.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

O procedimento de ensaio é baseado na caracterização pela Técnica de Excitação por Impulso do módulo de elasticidade e amortecimento em função da variação de temperatura de dois corpos de prova de $\text{Ni}_{55}\text{Ti}_{45}$ (wt%), martensítico a temperatura ambiente, com e sem tratamento criogênico.

Os corpos de prova utilizados foram, primeiramente, cortados com uma serra circular de disco abrasivo e, então, submetidos a um banho de ultrassom para a retirada de qualquer contaminação externa.

Os dados coletados para as dimensões geométricas e massa dos corpos de prova são representados nas Tabelas 3.3 e 3.4. Para obtenção de maior precisão na determinação das características geométricas (comprimento e diâmetro) foram realizadas medições em três regiões distintas do corpo de prova para cada parâmetro, girando a peça e próximo ao centro de massa. Os instrumentos de medida utilizados foram um paquímetro, com incerteza de 0,05 mm, e uma balança digital de precisão, com incerteza de 0,0001 g. Esses dados são os valores de entrada para o início da utilização do software, assim como a característica geométrica do corpo de prova, no caso uma barra cilíndrica maciça.

Tabela 3.3 – Dados referentes ao comprimento, diâmetro e massa da Amostra_1.

Medida	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)
1	60,55	10,00	30,6572
2	60,75	10,10	30,6572
3	60,70	10,05	30,6571
-	Valores médios		
-	60,67	10,05	30,6572
-	Desvio padrão		
-	0,104083	0,05	0
Valor médio	$60,67 \pm 0,15$	$10,05 \pm 0,1$	$30,6572 \pm 0,0001$

Tabela 3.4 - Dados referentes ao comprimento, diâmetro e massa da Amostra_2.

Medida	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)
1	60,56	10,05	30,657
2	60,74	10,10	30,657
3	60,72	10,05	30,6569
-	Valores médios		
-	60,673	10,07	30,6569
-	Desvio padrão		
-	0,104083	0,05	0
Valor médio	$60,67 \pm 0,15$	$10,07 \pm 0,1$	$30,6569 \pm 0,0001$

A partir dos dados encontrados nas Tabelas 3.3 e 3.4, a programação do sistema de aquecimento e resfriamento do corpo de prova foi realizada. A faixa de variação de temperaturas escolhida para a análise do módulo elástico e amortecimento foi determinada com base nas temperaturas de transformação de fase do material, uma vez que o ciclo térmico de interesse programável deve

informar como as propriedades mecânicas são influenciadas à medida em que o material muda de fase, ou seja, sabendo que o material encontra-se na fase martensítica à temperatura ambiente, deve-se escolher uma faixa de temperaturas ideal que percorra todas as temperaturas referentes à transformação de fase do material.

A Figura 3.9 ilustra esquematicamente como o sistema programável foi montado. As temperaturas inicial e final são iguais a -10°C e 100°C , respectivamente, tanto para aquecimento quanto para resfriamento e o tempo de análise para todo o processo foi de 220 minutos. Primeiramente, foi realizado um programa referente à rampa de aquecimento (-10°C a 100°C) para se obter a análise da variação do módulo de elasticidade e amortecimento em relação à transformação de fase inversa de martensita para austenita, ou seja, como essas propriedades mecânicas variam ao longo do processo de mudança de fase em função da elevação de temperatura. Em seguida foi realizado um programa referente à rampa de resfriamento (100°C a -10°) para se verificar como o módulo elástico e o amortecimento variam em relação ao processo direto da mudança de fase, ou seja, da transformação de austenita para martensita.

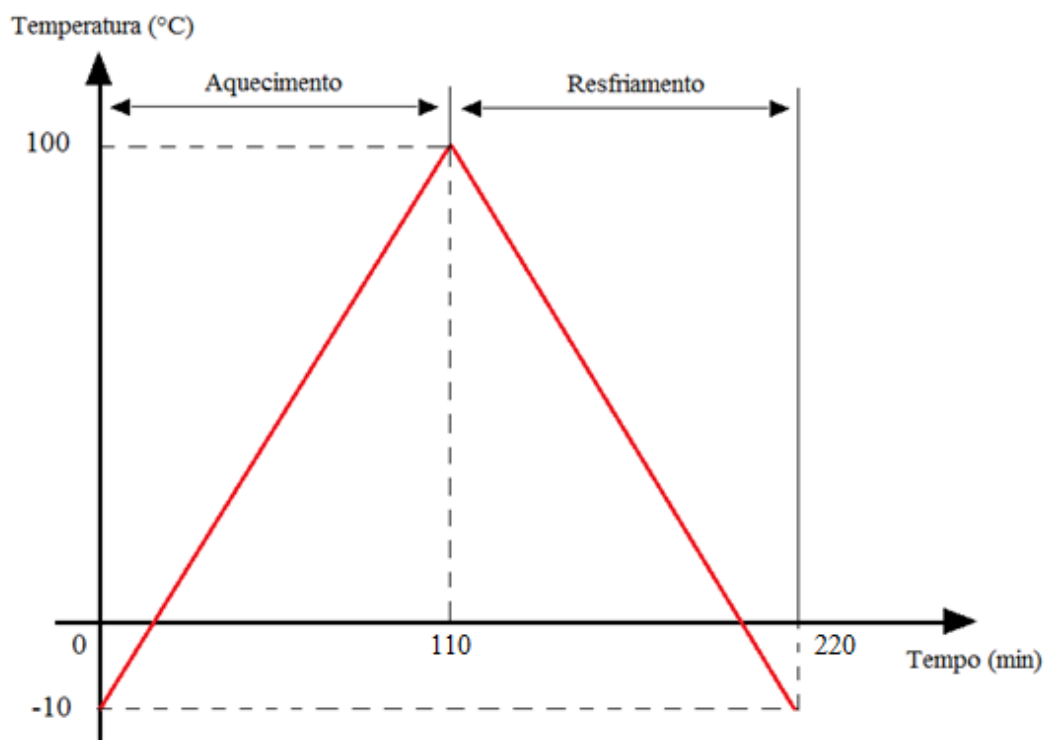


Figura 3.9 – Rampas de aquecimento e resfriamento programadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados todos os resultados obtidos para o material analisado pela Técnica de Excitação por Impulso em função da temperatura.

4.1 RESULTADOS E ANÁLISES DA TÉCNICA DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO

A densidade (ρ) da amostra e a posição da mesma em relação aos fios metálicos de sustentação são dados automaticamente pelo Software. A densidade é calculada através das dimensões da amostra e a posição de apoio é especificada pelo software em $0,224L$, onde L é o comprimento da amostra. A densidade e posição de sustentação encontrados foram $\rho = 6,37 \text{ g/cm}^3$ e $13,59 \text{ mm}$, respectivamente.

Os resultados obtidos para as amostras em análise, tanto para o amortecimento quanto para o módulo de elasticidade estão disponíveis nas Tabelas 4.1 e 4.2. As curvas encontradas para o módulo de elasticidade em função da temperatura e do amortecimento em função da temperatura também são apresentadas (Figs. 4.1 a 4.4). As rampas de aquecimento e resfriamento em função do tempo obtidas através do software durante o ensaio, tanto para a Amostra_1 quanto para a Amostra_2, estão ilustradas nas Figs. 4.9 e 4.10, respectivamente.

Tabela 4.1 - Diferenças percentuais de amortecimento durante aquecimento e resfriamento em relação as fases das amostras 1 e 2.

Fator de amortecimento (ζ)				
Amostra	Região	Fase	Valor médio (e-6)	Erro ± (e-6)
Amostra_1	Aquecimento	Martensita	3253,98	685,9771
		Austenita	3124,63	565,2477
	Resfriamento	Martensita	3619,56	671,3244
		Austenita	240,37	86,96114
Amostra_2	Aquecimento	Martensita	3163,1	622,6282
		Austenita	2884,16	942,9444
	Resfriamento	Martensita	3910,24	1028,988
		Austenita	468,92	152,99
Diferenças percentuais				
Região	Fase		Valor percentual (%)	
Aquecimento	Martensita		- 2,79	
	Austenita		- 7,69	
Resfriamento	Martensita		+ 8,03	
	Austenita		+ 95,07	

Tabela 4.2 - Diferenças percentuais de módulo de elasticidade durante aquecimento e resfriamento em relação as fases das amostras 1 e 2.

Módulo de elasticidade (E)				
Amostra	Região	Fase	Valor médio (GPa)	Erro ± (GPa)
Amostra_1	Aquecimento	Martensita	63,33	1,87
		Austenita	61,33	1,56
	Resfriamento	Martensita	49,50	1,61
		Austenita	71	1,86
Amostra_2	Aquecimento	Martensita	65,34	1,92
		Austenita	59,72	1,70
	Resfriamento	Martensita	49,29	1,41
		Austenita	69,62	2,00
Diferenças percentuais				
Região	Fase		Valor percentual (%)	
Aquecimento	Martensita		+ 3,17	
	Austenita		- 2,62	
Resfriamento	Martensita		- 0,42	
	Austenita		- 1,94	

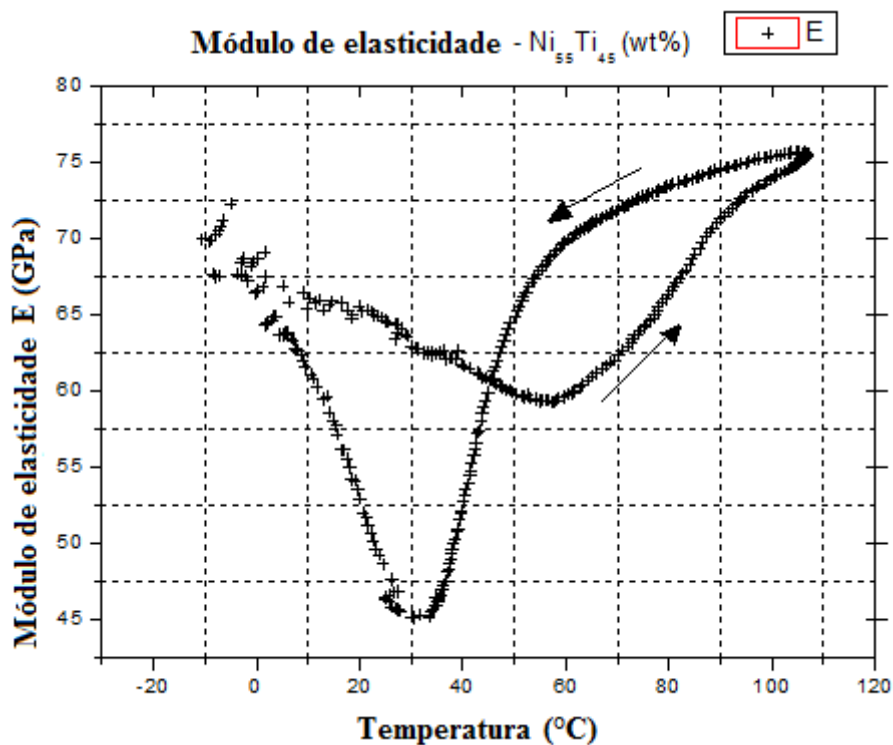


Figura 4.1 - Módulo de elasticidade em função da variação de temperatura para a Amostra_1.

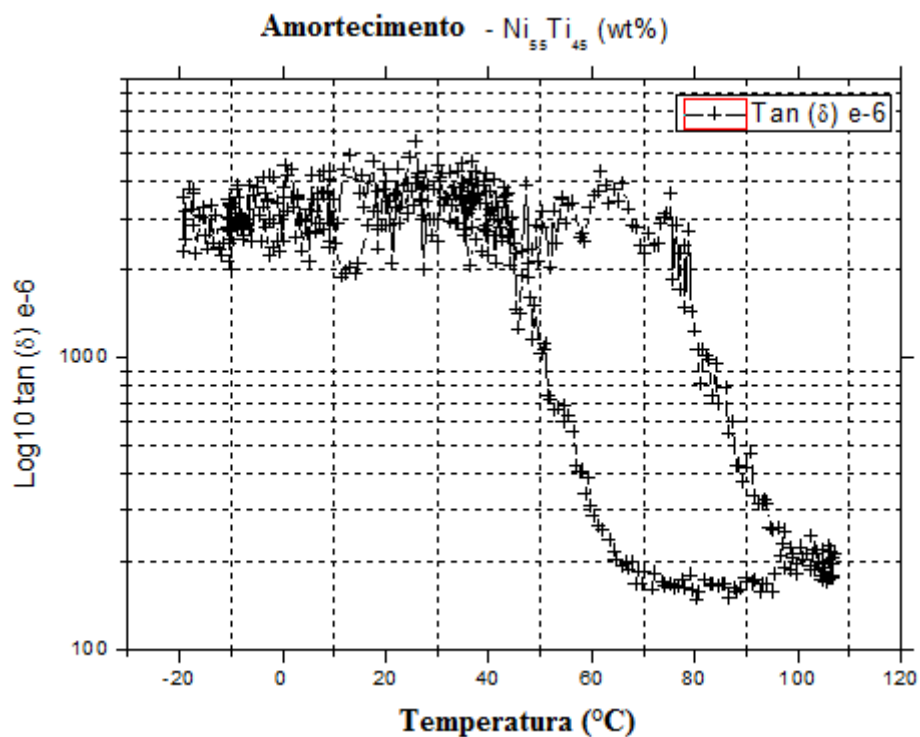


Figura 4.2 - Amortecimento em função da variação de temperatura para a Amostra_1.

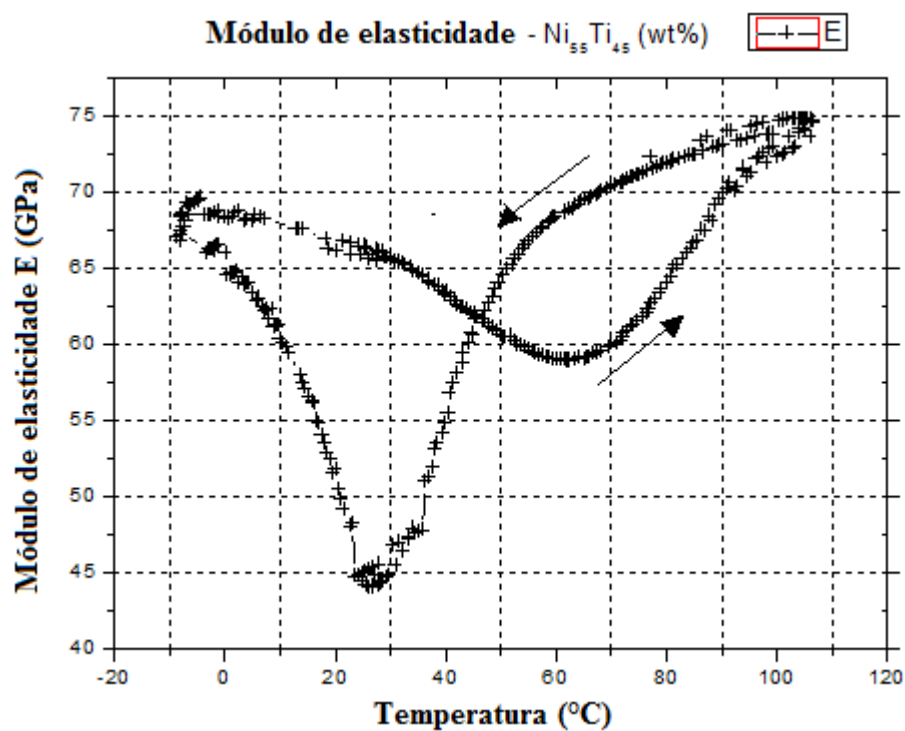


Figura 4.3 - Módulo de elasticidade em função da variação de temperatura para a Amostra_2.

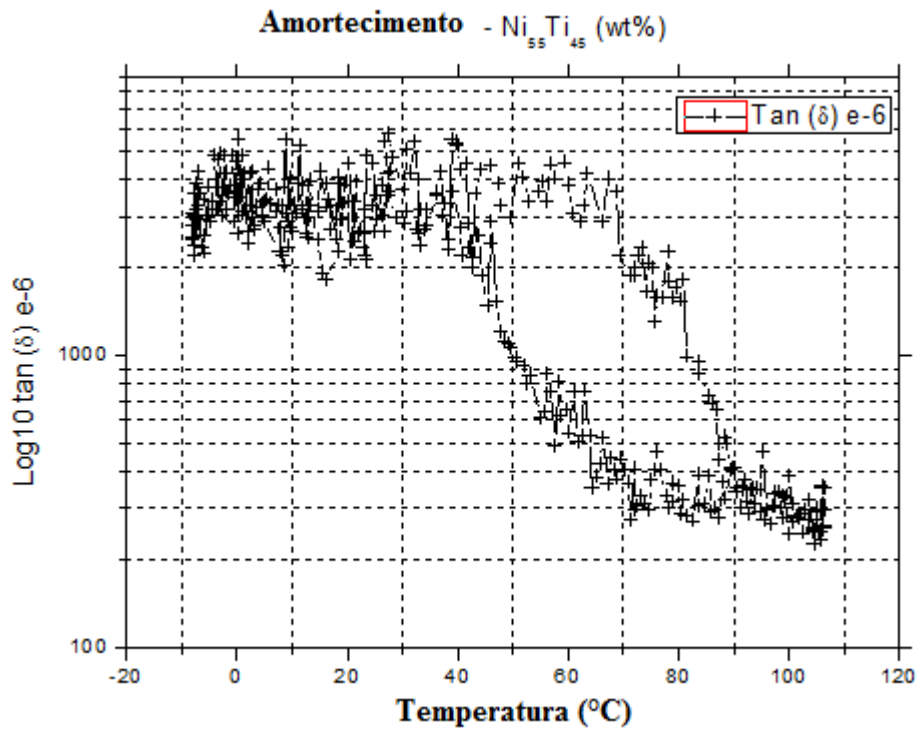


Figura 4.4 - Amortecimento em função da variação de temperatura para a Amostra_2.

Analisando as Figs. 4.1 e 4.3, referentes ao módulo de elasticidade da Amostra_1 e Amostra_2, respectivamente, pode-se observar que o comportamento é similar tanto durante o aquecimento quando durante o resfriamento dos corpos de prova. A maior variação observada dessa propriedade encontra-se na região de resfriamento para as duas amostras. O maior valor encontrado para o módulo elástico da Amostra_1 foi de $75,64 \pm 1,62$ GPa e para a Amostra_2 foi de $74,99 \pm 1,63$ GPa, ambos durante a rampa de aquecimento, quando o material encontra-se totalmente na fase austenítica. Por outro lado, os menores valores do módulo elástico foram alcançados durante o processo de resfriamento das amostras, quando o material encontra-se na região de transição direta de fase, ou seja, de austenita para martensita. Em relação a Amostra_1, o menor valor foi igual a $45,13 \pm 1,62$ GPa e para a Amostra_2 igual a $44,89 \pm 1,61$ GPa.

Em relação ao amortecimento, tanto para a Amostra_1 quanto para a Amostra_2 o comportamento das curvas também é similar. Para ambas, o amortecimento é maior na fase martensítica em relação a fase austenítica. Nas Figs.4.5 a 4.8 verifica-se de forma detalhada como essa propriedade varia ao longo do aquecimento e resfriamento para as duas amostras em estudo.

É possível notar que, na fase martensítica para as duas amostras, tanto durante o aquecimento quanto durante o resfriamento, observa-se uma maior dispersão dos pontos. A distribuição mais uniforme da curva é verificada durante as transformações de fase direta e reversa.

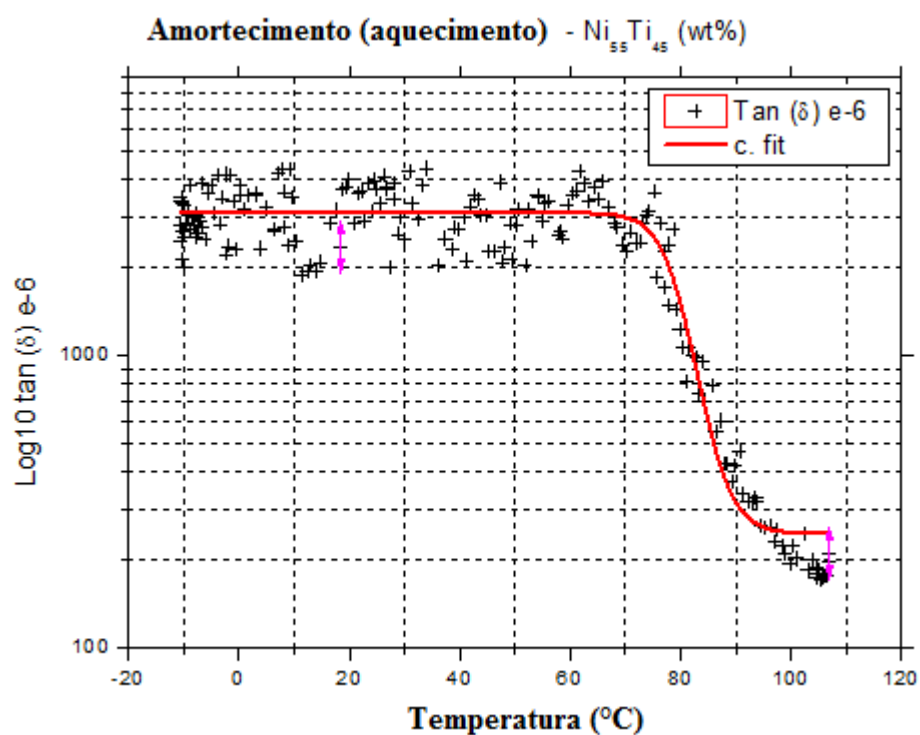


Figura 4.5 - Curva de amortecimento durante o aquecimento da Amostra_1.

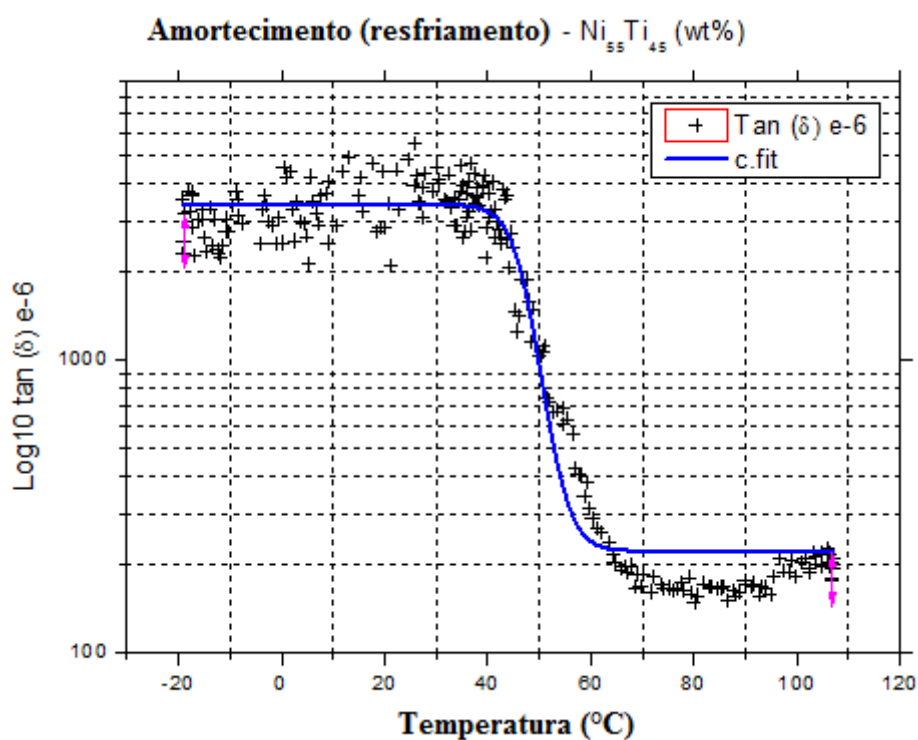


Figura 4.6 - Curva de amortecimento durante o resfriamento da Amostra_1.

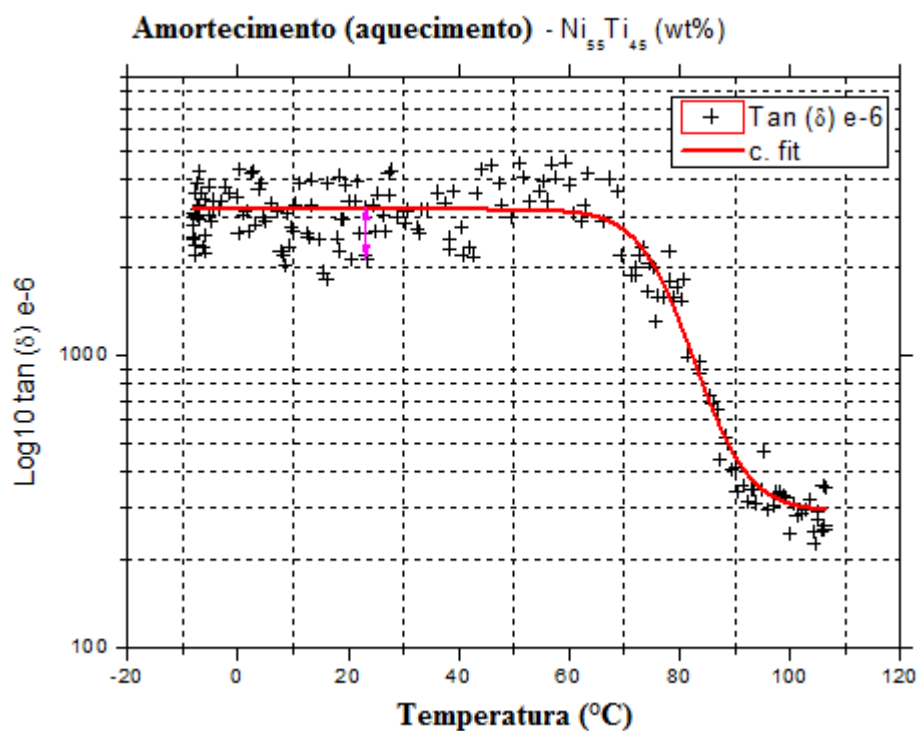


Figura 4.7 - Curva de amortecimento durante o aquecimento da Amostra_2.

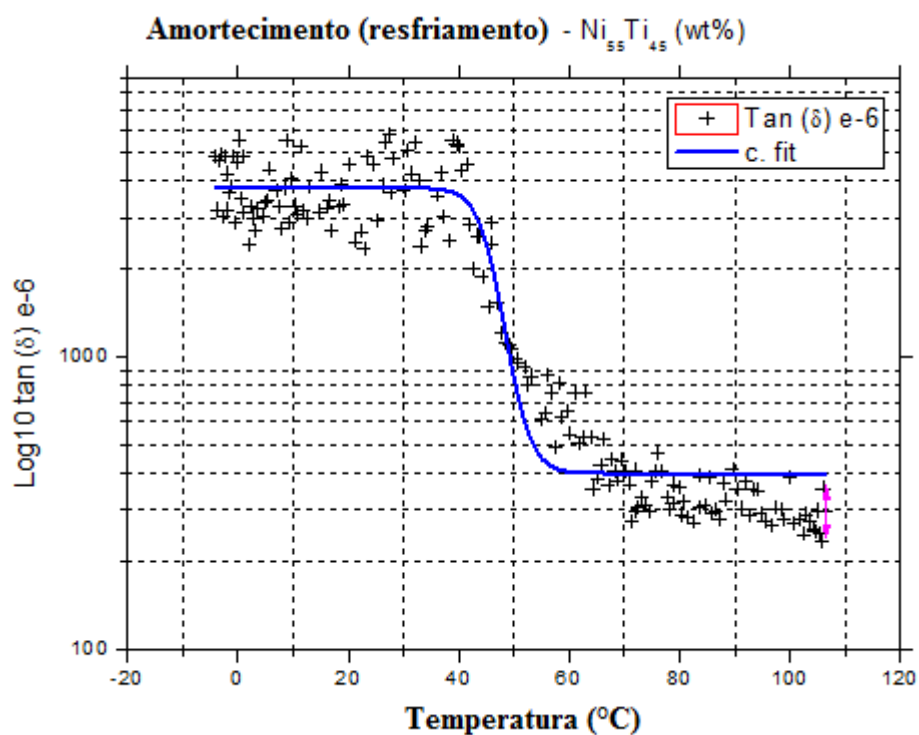


Figura 4.8 - Curva de amortecimento durante o resfriamento da Amostra_2.

O aumento significativo observado para o amortecimento está associado à movimentação interna da estrutura do material, caracterizado pela movimentação reversível das diferentes variantes da rede cristalina e distâncias interplanares. A partir disso, conclui-se que o amortecimento é uma propriedade consideravelmente sensível ao tratamento criogênico para a liga Ni₅₅Ti₄₅ (wt%) em estudo.

Nas Figs. 4.9 e 4.10 estão ilustradas as curvas referentes às rampas de aquecimento e resfriamento em função do tempo para a Amostra_1 e Amostra_2, respectivamente. Nota-se que a taxa de aquecimento e resfriamento para ambos os ensaios manteve-se praticamente constante, com um tempo médio total de ensaio igual a 270 minutos para cada amostra.

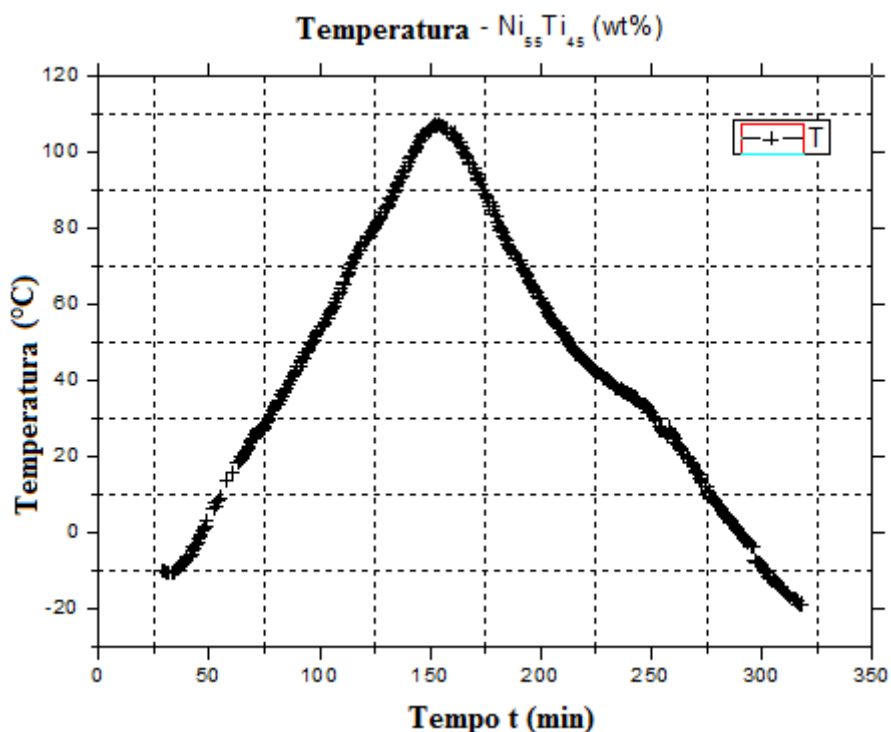


Figura 4.9 - Temperatura em função do tempo para a Amostra_1.

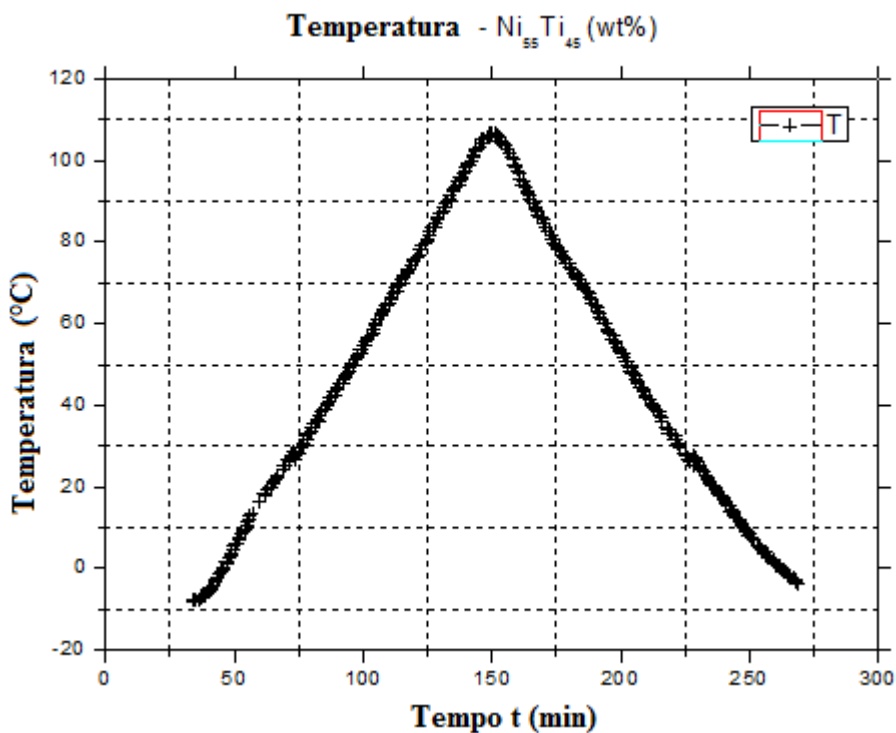


Figura 4.10 - Temperatura em função do tempo para a Amostra_2.

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo serão explicitadas as conclusões finais deste trabalho.

A partir dos resultados obtidos pelo estudo do módulo elástico e do amortecimento em função da temperatura para a liga Ni₅₅Ti₄₅ (wt%) com e sem tratamento criogênico através da Técnica de Excitação por Impulso, conclui-se que:

- O módulo de elasticidade apresentou o maior aumento percentual igual a 3,17 %, dentro da faixa de aquecimento, para a fase martensítica da liga. A maior diminuição percentual verificada para essa propriedade foi igual a - 2,62 %, também durante o aquecimento, porém, quando o material encontra-se na fase austenítica.
- Considerando a margem de erro média para o módulo elástico igual a $\pm 1,7$ GPa dentro da faixa de aquecimento, pode-se dizer que esta propriedade não variou de forma significativa. Este resultado é esperado, uma vez que o módulo elástico é uma propriedade pouco sensível a tratamentos térmicos, mas muito influenciada pelo tipo de ligação existente e composição química do material.
- O amortecimento apresentou a maior diminuição percentual dentro da faixa de aquecimento na fase martensítica igual a 2,79 %. O maior aumento verificado foi, durante o resfriamento, igual a 95,07 %, na fase austenítica.

O tratamento criogênico ainda é recente em relação as suas aplicações nas ligas NiTi com memória de forma. Neste contexto, sugere-se como análise futura a caracterização da influência do tratamento criogênico através da realização de difratometria de Raio-X e microscopia eletrônica de varredura para a liga NiTi com memória de forma tratada criogenicamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, S.F. (2005). “Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura”. Tese (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos.
- Aseka, E.H (2002). “Projeto, Construção e Determinação de Propriedades de Amortecedor Viscoelástico para Uso em Estruturas”. Tese (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Ashiuchi, Edgar S. (2009). Influência do tratamento criogênico na fadiga sob condições de fretting no AL 7050-T7451. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 95p.
- ASM International. Metals Handbook. Vol.3., Alloy Phase Diagrams. Materials Park, Ohio: ASM International, 1992.
- ATCP Engenharia Física. Disponível em: <<http://www.atcp.com.br/pt/produtos/caracterizacao-materiais/sonelastic/tecnica-excitacao-impulso.html>>
- ATCP Engenharia Física (2012). Manual de instalação e operação Software Sonelastic® Versão 2.2. Software para caracterização dos módulos de elasticidade e amortecimento de materiais pela Técnica de Excitação por Impulso (Técnica das Frequências Naturais de Vibração).
- Cai, W.; Lu, X.L.; Zao, L.C.; Damping behavior of Ni-Ti based shape memory alloys, Materials Science and Engineering A, v.394, pp. 78-82, 2005.
- Callister Jr., W.D (1998). Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução, John Wiley & Sons, New York, - 5ª ed.
- Carlson, Earl A. (1969). “Heat Treating. Cold Treating and cryogenic treatment of steel”. Asm Metal Handbook, Lindberg ed. Heat Treating Company, Vol.4, Ninth Edition. Ed. Lyman Taylor, Metals, USA.
- Carmen, D.S Catão .et al. (2012). Obtenção e Avaliação de Ligas de NiTi Tratadas a Laser e Recobertas com Apatita para Aplicação em Implantes Odontológicos.
- Cossolino, L.C.; Pereira, A.H.A (2010). Módulos Elásticos: visão geral e métodos de caracterização. Informativo Técnico Científico ITC-ME/ATCP. ATCP Engenharia Física, 27p.
- Da Silva, T.C et al (2014). “Efeito do recozimento nas temperaturas de transformação de fase de uma liga NiTi”. Artigo 69º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM). Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
- Delaey, L.; Krishnan, R.V; Warlimont, H. et al (1974). “Thermoelasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations, Part. 1 Structural and microstructural changes”. *Journal of Materials Science*, vol. 9, p.1521-1535.
- Dias, R.F (2005). “Efeito da deformação cíclica nas propriedades mecânicas de uma liga NiTi superelástica”. Tese (Doutorado em Metalurgia Física). Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia da UFMG.
- Fernandes, F.M.B (2003). Ligas com memória de forma. Departamento de Ciência dos Materiais/CENIMAT, Universidade Nova de Lisboa.
- Frenzel et al., (2004). “High quality vacuum induction melting of small quantities of NiTi shape memory alloys in graphite crucibles”. Materials science e engineering, p.299-310.
- Funakubo, H. Shape Memory Alloys. Precision Machinery and Robotics. Versão Inglesa traduzida em Japonês por J.B. Kennedy. Gordon and Breach Science Publishers, 1987.
- Hodgson, D.E.; Wu, M.H.; Biermann, R.J (1990). Shape memory alloys Metals Handbook. Vol. 2. ASM International, Ohio, p.897-902.
- Hodgson D.E.; Brown, J.W., (2000). Using Nitinol Alloys (Shape Memory Applications, Inc, San Jose, CA).
- Hodgson, D.E., Wu, Brown, Jeffrey W. Using Nitinol Alloys. Shape memory Applications, Inc. 2000.
- Lagoudas, D.C (2008), Shape Memory Alloys – Modeling and Engineering Applications.
- Leskovsec, V.; Kalin, M.; Vizintin, J. (2006). Influence of deep-cryogenic treatment on wear resistance of vacuum heat-treated HSS. In: Vacuum, v.80, p.507-518.
- Libenson, C. et al. Differences in the pseudoelasticity behavior of NiTi orthodontic wires. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 4, p. 281-84, 1993.

- Miyazaki, S (1998). "Medical and dental applications of shape memory alloys", in: Shape Memory Materials. Otsuka, K.; Wayman, C.M., eds, Cambridge University Press, 267-281.
- Negrão, G.Q (2012). "Análise de uma Máquina para Conversão Termomecânica de Energia Baseada em Ligas com Memória de Forma". Tese (Monografia em Engenharia Mecânica). Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
- Otsuka K., Ren X., Recent Developments in the research of shape memory alloys, Institute of Materials Science, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573, Japan 1998.
- Otsuka,K& Ren, X (1999). Recent developments on the research of shape memory alloys. *Intermetallics*, 7: 511-528.
- Otsuka K., Wayman C.M.,(1998). "Shape Memory Materials", Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Quintão, C.C (2000). "Fios ortodônticos utilizados em fase inicial de tratamento: propriedades mecânicas e desempenho clínico". Tese (Doutorado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Faculdade de Odontologia.
- Rao, S.; Vibrações Mecânicas, 4ª ed, Ed.Pearson Prentice Hall, 2008.
- Sartori, C.H.; Yoshida, S.; Fagundes, M.G. (2006). Efeito do tratamento criogênico na tenacidade à fratura dos aços AISI M2, AISI D2 e aço para trabalho a frio com 8% Cr. In: 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro- RJ.
- Shape Memory Alloy Research Team (Smart) (2001). <http://smart.tamu.edu>
- Shape Memory Applications, Inc. (2001). <http://www.sma-inc.com>.
- Shaw, J.A.; Kyriakides, S. Thermomechanical Aspects of Ni-Ti. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 43 (8): pp. 1243-1281, 1995.
- Silva, C.W (2007). *Vibration Damping, control and design*. Vancouver, Canada: Taylor & Francis group.
- Silva, E.P; Castilho, W.S. (2011). Algumas aplicações das ligas com memória de forma. Shape memory Alloys – SMA. Sinergia, São Paulo, v.12, p. 99-108.
- Silva, N.J. et al (2011). Estudo Comparativo das Propriedades Dinâmicas de uma Liga NiTi com Memória de Forma e Materiais Estruturais Clássicos. *Revista Matéria*, v.16, pp.830-835.
- Stoeckel, D., (1990). Shape Memory Actuators for Automotive Applications.
- Thompson, S.A. An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry. *International Endodontic Journal*, v.33, p.297-310, 2000.
- Thorby, D. *Structural Dynamics and Vibrations in Practice – An Engineering Handbook*. Oxford, UK: Elsevier Ltd, 2008.
- Turner, T.L (2000). "SMA Hybrid Composites for Dynamic Response Abatement Applications" in: 7th International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics. University of Southampton, p.453-465.
- Van Humbeeck, J (1999). Non-medical applications of shape memory alloys. *Materials Science and Engineering A*, 273-275: 134-148.
- Van Vlack L.H (2000). *Princípios de Ciência dos Materiais*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, p.135-147.
- Villarinho, D.J (2010). "Caracterização de uma liga NiTi visando confecção e aplicação com material biomédico em órtese Grampo de Judet". Tese (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia.
- Wayman, C.M. & Duerig, T.W. (1990). "Engineering Aspects of Shape Memory Alloys". Org. Duerig, T.W., Melton, K.N., Stoeckel, D., Wayman, C.M. Butterworth-Heinemann., p.3-20.
- Wu, S.K & Lin, H.C (2000). Recent development of TiNi based in shape memory alloys in Twain. *Materials Chemistry and Physics*, 64: 81-92.
- Yun, D., Xiaoping, L., Hongshen, X. (2008); Deep Cryogenic treatment of high-speed steel and its mechnism. In: *Heat Treatment of Metals*, v.3, p.55-59.

	Pág.
Anexo I	
Programação dos parâmetros de configuração do equipamento Sonelastic® Crio	45

ANEXO I: Programação dos parâmetros de configuração do equipamento Sonelastic® Crio

CICLO DE OPERAÇÃO	CICLO DE SINTONIA	CICLO DE PROGRAMAS	CICLO DE ALARMES	CICLO DE ESCALA	CICLOS DE IOS
Auto: Yes/No (no Yes o ciclo é realizado)	Pb: 0,5	t.bAS: Min (minutos)	FuA1: IErr	tyPE: tc t (termopar tipo t)	Io1: 0
Pr n: 1	Ir: 0,56	Pr n: 1	FuA2: Lo	dPP0: 0,0	Io2: 2
run: Yes (Coloca o programa em execução)	dt: 21	Ptol: 2,0	FuA3: oFF	unit: °C	Io5: Ctrl
—	Ct: 0,5	PSP0: -10 (temp. inicial aquecimento)	FuA4: oFF	OFFS: 0,0	—
—	ACt: rE	Pt1: 110 (intervalo de tempo)	bLA1-4: no	SPLL: -80 (limite mínimo p/ o set point)	—
—	bIAS: 0,0	PE1: ---	HyA1: 0	SPLL: 100,0 (limite máximo p/ o set point)	—
—	ouLL: 0,0	PSP1: 100,0 (temp. final aquecimento)	HyA2: 1	Demais parâmetros desabilitados	—
—	ouHL: 100,00	Pt2: 110 (intervalo de tempo)	HyA2:2-4: 0	—	—
—	SFSt: 0	PE2: ---	A1t1: 0	—	—
—	SP.A1: 0,0	PSP2: -10 (temp. final resfriamento)	A2t2: 0	—	—
—	SP.A2: 25	Demais parâmetros: 0	A1t2: 0	—	—
—	SP.A3: 0,0	—	A2t2: 0	—	—
—	SP.A4: 0,0	—	—	—	—